

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica
Trabalho de Conclusão de Curso II

Análise da integração/co-existência de múltiplos atores de tecnologia 4G na mesma infraestrutura de rede

Autor: Pablo Henrique Pinheiro Lima
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Brasília, DF
2014



Pablo Henrique Pinheiro Lima

Análise da integração/co-existência de múltiplos atores de tecnologia 4G na mesma infraestrutura de rede

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Brasília, DF

2014

Pablo Henrique Pinheiro Lima

Análise da integração/co-existência de múltiplos atores de tecnologia 4G na mesma infraestrutura de rede/ Pablo Henrique Pinheiro Lima. – Brasília, DF, 2014
102 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Trabalho de Conclusão de Curso II – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2014.

1. LTE. 2. *RAN sharing*. I. Prof. Dr. Leonardo Aguayo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise da integração/co-existência de múltiplos atores de tecnologia 4G na mesma infraestrutura de rede

Pablo Henrique Pinheiro Lima

Análise da integração/co-existência de múltiplos atores de tecnologia 4G na mesma infraestrutura de rede

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Brasília, DF, 24 de junho de 2014:

Prof. Dr. Leonardo Aguayo
Orientador

Prof. Dr. Cristiano Jacques Miosso R. Mendes
Examinador Interno

Prof. Dr. Georges Daniel Amvame-Nze
Examinador Interno

Brasília, DF
2014

Resumo

Devido ao desenvolvimento das tecnologias celulares, em especial a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), as provedoras de serviço móvel necessitam de mais investimento em infraestrutura em um momento de alto número de usuários e redução dos preços de serviços. Em consequência, vários estudos no contexto da oportunidade de compartilhamento da rede de acesso aos recursos de rádio tem demonstrado que essa tática pode diminuir os custos das operadoras significativamente. Entretanto, muitos desafios ainda envolvem a prática de coexistência de múltiplos atores de tecnologia 4G na mesma infraestrutura de rede. Dessa forma, este trabalho de conclusão de curso tem como foco a análise de estratégias de integração/coexistência de duas provedoras de serviço móvel na mesma infraestrutura de rede, em especial no caso mencionado. Para a coleta de dados de análise, foi desenvolvido um simulador de uma rede LTE em ambiente Matlab® para modelar o comportamento do tráfego em diferentes cenários de compartilhamento. O simulador abrange as características mais importantes da tecnologia, no âmbito do compartilhamento de acesso aos recursos de rádio, e utiliza três modelos de tráfego de alta demanda no LTE: serviço de VoIP, *video streaming* e navegação web HTTP. A análise dos resultados enfatiza o contexto econômico do compartilhamento, devido ao investimento dos atores em um dos serviços. Estudos futuros também são sugeridos, para envolver outros tipos de integração de infraestrutura de rede permitidos pela padronização.

Palavras-chaves: LTE, *Long Term Evolution*, 3GPP, compartilhamento, RAN *sharing*.

Abstract

Due to the development of mobile technologies, particularly the LTE (Long Term Evolution), mobile service providers need more investment in infrastructure at a time of high number of users and reduce the prices of services. Consequently, several studies in the context of the opportunity to share the radio access network has shown that this tactic can reduce costs for operators significantly. However, many challenges still involve the practice of coexistence of multiple 4G technology actors in the same network infrastructure. Thus, this course conclusion work focuses on the analysis of integration/coexistence strategies of two mobile service providers in the same network infrastructure, in particular in the aforementioned case. To collect data for analysis, a simulator of an LTE network was developed in Matlab[®], to model the traffic behavior in different sharing scenarios. The simulator covers the most important features of the technology in the context of access to radio resource sharing, and uses three models of high demand traffic in LTE: VoIP service, video streaming and web browsing HTTP. The analysis emphasizes the economic context of sharing due to investment of the actors in one of the services. Further studies are suggested to involve other types of network infrastructure integration allowed for standardization.

Key-words: LTE, *Long Term Evolution*, 3GPP, coexistence, RAN *sharing*.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução aproximada das comunicações móveis até a quarta geração. Fonte: <i>LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice</i> [1].	26
Figura 2 – Exemplo de múltiplo acesso em recursos de rádio no LTE. Fonte: <i>Tecnologias de camada física e MAC para redes LTE</i> [2].	28
Figura 3 – Representação de um sistema MIMO $M \times N$. Fonte: <i>LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance</i> [3].	29
Figura 4 – Elementos do EPS – arquitetura de rede de rádio (LTE) e do núcleo da rede (EPC). Adaptado de: <i>LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice</i> [1].	32
Figura 5 – Pilha de protocolos (a) no plano do usuário e (b) no plano de controle. Fonte: <i>LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance</i> [3].	33
Figura 6 – Arquitetura geral de rádio do LTE, apresentando tanto as camadas como os canais/bearers. Fonte: <i>LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice</i> [1].	34
Figura 7 – Arquitetura geral apresentando as funções da camada MAC. Fonte: <i>LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice</i> [1].	36
Figura 8 – Método tradicional de transporte de múltiplas portadoras: o receptor seleciona cada portadora individualmente a partir de um filtro passa faixa.	38
Figura 9 – Método de transporte de informação utilizando o OFDM, provendo economia de banda.	38
Figura 10 – Representação gráfica da ortogonalidade entre os sinais de banda estreita (subportadoras), formando um sinal de banda larga (envoltória).	39
Figura 11 – Esquema de transmissão e recepção OFDM. Fonte: <i>LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance</i> [3].	40
Figura 12 – <i>Resource Block</i> no espaço tempo-frequência.	41
Figura 13 – Comparação entre o OFDMA e o SC-FDMA, em relação à modulação de informação.	41
Figura 14 – Estrutura de um <i>frame</i> no LTE, com duplexação FDD.	42
Figura 15 – Mapeamento das principais funcionalidades de RRM nas diferentes camadas, tanto no plano de controle quanto no plano de usuário. Fonte: <i>LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access</i> [4].	45
Figura 16 – Tipos de relatórios CQI informados pelo UE.	48

Figura 17 – Arquiteturas de compartilhamento de rede permitidas pelo 3GPP. Fonte: <i>NEC's Approach towards Active Radio Access Network Sharing</i> [8].	51
Figura 18 – Diagrama de blocos básico do sistema implementado em software apresentando seus elementos principais.	58
Figura 19 – Indicação (em destaque) das funções de Administração de Recursos de Rádio implementadas no simulador. Fonte: <i>LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access</i> [4].	59
Figura 20 – Diagrama de estados da cadeia de Markov de nível superior representando as transições entre as três modulações.	61
Figura 21 – Representação da seleção de CQI em uma sub-banda de cada parte da largura de banda, de acordo com o padrão do 3GPP. Fonte: <i>LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance</i> [3].	63
Figura 22 – Exemplo para alocação de recursos Tipo 0, com uma largura de banda de 5 MHz (25 RBs).	65
Figura 23 – Representação do diagrama de estados do modelo de atividade de voz. Fonte: <i>LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance</i> [3].	67
Figura 24 – Matriz de retorno do modelo no simulador para o tráfego de voz.	68
Figura 25 – Comportamento dos pacotes de dados em uma sessão de navegação web. Fonte: <i>LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance</i> [3].	69
Figura 26 – Etapas do escalonamento de recursos implementado no simulador, considerando os parâmetros QoS e a qualidade do canal.	71
Figura 27 – Cenário 1 – caso I: (a) <i>Throughput</i> das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.	80
Figura 28 – Cenário 2 – caso I: (a) <i>Throughput</i> das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.	81
Figura 29 – Cenário 3 – caso I: (a) <i>Throughput</i> das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.	82
Figura 30 – Cenário 4 – caso I: (a) <i>Throughput</i> das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.	83
Figura 31 – Cenário 5 – caso I: (a) <i>Throughput</i> das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.	84

Figura 32 – Cenário 6 – caso I: (a) <i>Throughput</i> das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.	85
Figura 33 – <i>Throughput</i> médio das operadoras para os diferentes cenários, com 50 usuários, no caso (a) I, (b) II e (c) III.	86
Figura 34 – Eficiência de Recursos média das operadoras para os diferentes cenários, com 50 usuários, no caso (a) I, (b) II e (c) III.	87
Figura 35 – Comparação entre o (a) <i>Throughput</i> e a (b) eficiência média de recursos das operadoras para o cenário 2 – caso I, para diferentes números de usuários.	88
Figura 36 – Comparação entre o (a) <i>Throughput</i> e a (b) eficiência média de recursos das operadoras para o cenário 5 – caso I, para diferentes números de usuários.	88
Figura 37 – Gráfico em barras representando a eficiência média alcançada por cada operadora em cada uma das estratégias possíveis, no primeiro jogo. . .	91
Figura 38 – Representação extensiva do primeiro jogo, em formato de árvore, no caso de um jogo sequencial.	92
Figura 39 – Gráfico em barras representando a eficiência média alcançada por cada operadora em cada uma das estratégias possíveis, no segundo jogo. . .	94
Figura 40 – Representação extensiva do segundo jogo, em formato de árvore, no caso de um jogo sequencial, se a decisão inicial é da operadora (a) A ou (b) B.	95

Lista de abreviaturas e siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
3GPP2	<i>3rd Generation Partnership Project 2</i>
ACK	<i>ACKnowledgement</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i>
AS	<i>Access Stratum</i>
CAPEX	<i>capital expenditure</i>
DRX	<i>Discontinuous Reception</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
E-ULTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
ENodeB	<i>Evolved NodeB</i>
DCI	<i>Downlink Control Indicator</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
GBR	<i>Guaranteed Bit Rate</i>
GPRS	<i>General packet radio service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GCN	<i>Gateway Core Network</i>

HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
ITU	<i>International Mobile Telecommunications</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MOCN	<i>Multi-Operator Core Network</i>
MNO	<i>Mobile Network Operators</i>
MVNO	<i>Mobile Virtual Network Operators</i>
NACK	<i>Non-ACKnowledgement</i>
NAS	<i>Non-access stratum</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OPEX	<i>Operating expense</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
PCRF	<i>Policy Control Enforcement Function</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>

PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>
PHY	<i>Physical layer</i>
PMCH	<i>Physical Multicast Channel</i>
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
P-SS	<i>Primary Synchronization</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QCI	<i>QoS class identifier</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RBG	<i>Resource Block Group</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
RS	<i>Reference Signal</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SDU	<i>Service Data Unit</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i>
S-SS	<i>Secondary Synchronization</i>

TBS	<i>Transport Block Size</i>
TDD	<i>Time Divison Duplex</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UE	<i>User Equipament</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VoIP	<i>Voice-over-Internet protocol</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>wireless local area network</i>

Sumário

	Introdução	19
I	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
1	LONG TERM EVOLUTION: VISÃO GERAL	25
1.1	3GPP e Padronização do LTE	25
1.2	Requisitos para o LTE	26
1.3	Tecnologias para o LTE	27
1.3.1	Tecnologia de Multiportadora e Acesso Múltiplo	27
1.3.2	Técnicas de Múltiplas Antenas	28
2	ARQUITETURA DE REDE	31
2.1	Visão global	31
2.2	Arquitetura de Protocolos	32
2.2.1	Controle de Recursos de Rádio (RRC)	33
2.2.2	Protocolo de Convergência de Pacotes de dados (PDCP)	34
2.2.3	Controle do Enlace de Rádio (RLC)	35
2.2.4	Medium Access Control (MAC)	35
3	CAMADA FÍSICA	37
3.1	Acesso múltiplo	37
3.1.1	OFDMA (<i>downlink</i>)	38
3.1.2	SC-FDMA (<i>uplink</i>)	40
3.2	Parâmetros da Camada Física	41
3.3	Canais Físicos	42
3.3.1	<i>Downlink</i>	43
3.3.2	<i>Uplink</i>	43
4	GERENCIAMENTO DE RECURSOS DE RÁDIO	45
4.1	Controle de Admissão e Parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS)	46
4.2	Adaptação do Enlace (<i>Link Adaptation</i>)	46
4.3	Escalonamento Dinâmico de Recursos	47
5	COMPARTILHAMENTO DA REDE DE ACESSO DE RÁDIO (RAN SHARING)	51

II	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO	53
6	DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR	55
6.1	Simplificações	56
6.2	Modelagem do sistema	57
6.3	Geração de relatórios CQI	59
6.4	Procedimentos do UE para relatórios de Informação do Estado do Canal (CSI)	62
6.5	Procedimentos do UE para recepção do PDSCH	64
6.5.1	Tipo de alocação de recursos	64
6.5.2	Modulação e determinação do tamanho do Bloco de Transporte	65
6.6	Modelos de Tráfego	66
6.6.1	Modelo de tráfego de VoIP	66
6.6.2	Modelo de tráfego de navegação web HTTP	67
6.6.3	Modelo de tráfego de <i>streaming</i> de vídeo	69
6.7	Etapas e algoritmos de escalonamento	69
III	RESULTADOS E CONCLUSÕES	73
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
7.1	Parâmetros e premissas de simulação	75
7.2	Resultados da simulação	78
7.3	Aplicação da Teoria dos Jogos	89
8	CONCLUSÕES	97
	Referências	101

Introdução

Contextualização

Os serviços de comunicações *wireless*, em especial os sistemas de comunicações móveis, alcançam um amplo crescimento a cada transferência de geração. Entretanto, o espectro radioelétrico é um recurso escasso e este problema engloba de forma especial os sistemas móveis pois são serviços com alta demanda em determinadas áreas, cuja densidade populacional é considerável; as características desse tipo de serviço preveem uma maior dificuldade de gerenciamento do espectro quanto maior a quantidade de requisições de usuários. Tecnicamente, a administração dos recursos em tecnologias celulares para vários usuários presume uma maior necessidade de desenvolvimento em torno das possibilidades de acesso múltiplo, sejam físicas, como métodos de divisão por frequência ou tempo; sejam lógicas, como métodos de divisão por código ou concepção de algoritmos de escalonamento de recursos [5] [1] [2].

Neste cenário de aumento no tráfego de dados em redes celulares, as operadoras de redes móveis (MNOs, *Mobile Network Operators*) são obrigadas a evoluir constantemente a infraestrutura de rede, o que eleva tanto os custos de capital (CAPEX, *capital expenditure*) quanto os custos operacionais (OPEX, *operating expense*). Ainda, em razão do desenvolvimento de redes predominantemente de voz para redes cada vez mais baseada em dados, as receitas geradas às MNOs são cada vez menores, em termos relativos, pois os rendimentos gerados pelo crescimento acentuado do tráfego de dados não aumentam do mesmo modo [6].

Conforme relatado em [1], o LTE (*Long Term Evolution*), uma tecnologia padronizada pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), é atualmente o sistema de 4ª geração mais adotado pelos sistemas de comunicações móveis. Foi desenvolvido de forma a incrementar a taxa de transmissão e a eficiência espectral, em comparação com tecnologias de 3ª geração. Sua tecnologia de acesso fundamenta-se na multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM, *Orthogonal frequency-division multiplexing*), e a estrutura para diversos usuários tem base no análogo para o acesso múltiplo (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). O emprego dessas tecnologias, além de uma estrutura de rede mais simples, providencia uma diversidade maior de aplicações que ainda não foram possíveis com tecnologias de banda larga móveis anteriores, como aplicações de vídeo, capacidade para estrutura de VoIP (*Voice over Internet Protocol*), entre outras.

Como é um sistema *wireless* móvel com alta tendência a apresentar elevada de-

manda, também está sujeito ao problema relacionado à redução de lucros das operadoras. Nacionalmente, os obstáculos são ainda maiores, pelo fato da tecnologia ter sido implementada recentemente, e necessitar de muitos investimentos futuros. Além disso, resulta ao usuário compensar o prejuízo das MNOs, seja pelo preço do serviço, seja pela redução de qualidade.

O projeto de uma rede LTE, no entanto, deve garantir aos múltiplos usuários uma experiência satisfatória, conforme os requisitos previamente estabelecidos para o sistema. Portanto, à medida que avança o seu desenvolvimento, e consequentemente a requisição de seu serviço, a pesquisa em torno de possibilidades de gerenciamento de recursos produz resultados interessantes para a eficiência do sistema, e consequentemente para a economia em termos de CAPEX e OPEX. Neste contexto, o compartilhamento de rede entre MNOs é uma forma de reduzir o custo total.

No início das redes móveis, as operadoras de rede eram construídas inteiramente separadas. Desde então, uma evolução gradual desta abordagem vem sendo percebida, a começar pelo compartilhamento de localização, e recentemente, chegando à partilha da rede de acesso aos recursos de rádio, ou RAN (*Radio Access Network*) *sharing*. Na Europa, América do Norte e Ásia, infraestruturas de compartilhamento já foram acordadas entre as principais operadoras, mostrando economias de OPEX convincentes e futuras economias de CAPEX. Tanto empresas quanto reguladores de telecomunicações concordam que, nesta fase da indústria móvel, não faz mais sentido construir redes completamente desassociadas [7].

Portanto, a redução nos custos de planejamento, implementação, manutenção e modernização da rede torna-se o maior benefício do RAN *sharing*. Todavia, outras vantagens do procedimento podem ser listadas de acordo com [8] [9]:

- Novas fontes de receita: o compartilhamento exige a virtualização do espectro de rádio para simplificar o gerenciamento dos recursos, de forma que esse processo se desacople do tratamento dos recursos físicos. Essa estratégia provê maior flexibilidade e, como resultado, as operadoras de rede podem oferecer uma gama maior de contratos para operadoras móveis com rede virtual (MVNOs, *Mobile Virtual Network Operators*). Isso possibilita a geração de novas fontes de receitas oriundas de novos tipos de MVNOs, que antes não poderiam justificar o investimento para entrar no mercado.
- Serviços de rede: o compartilhamento de infraestrutura substitui a competição entre a cobertura de rede pela competição na provisão de serviços, gerando inovação e desenvolvimento da indústria de telecomunicações.
- Provisão de serviços para áreas rurais ou locais com mobilidade: a estratégia pode garantir o oferecimento de serviço para locais em que as operadoras não teriam

motivação para investimento, como áreas rurais ou rodovias. As operadoras podem, por exemplo, negociar as cidades em que cada uma implementa a rede e, via RAN *sharing*, permitir a atuação das demais.

- Menor *time-to-market*: com o esforço compartilhado entre os parceiros para desenvolvimento de tecnologias ou implementação de novas políticas, o tempo necessário entre a análise e a disponibilização de um serviço é reduzido.
- Sustentabilidade ambiental: a opção é melhor que as redes tradicionais em termos de sustentabilidade, por oferecer a redução de consumo de energia, e minimizar o impacto gerado pela implantação de mais antenas.

No LTE, o compartilhamento de RAN pode compreender cenários de implantação de rede interessantes, como exemplificado na referência [6]. De acordo com o artigo, uma MNO pode tornar-se uma MVNO na rede de outra operadora durante picos de tráfego, reduzindo o custo para a primeira e gerando receita para a segunda. Além disso, um provedor de um determinado serviço de internet (por exemplo, um hospedeiro de vídeos) pode alugar recursos de uma operadora para melhorar a qualidade de serviço aos seus clientes ou compartilhar custos do serviço. Esta situação gera novas fontes de receita para a operadora, e cria uma condição analisada por este trabalho, onde uma entidade (MNO ou MVNO) investe em um tipo de serviço específico sob o contexto do RAN *sharing*, especificamente na tecnologia LTE.

A motivação para uma pesquisa do tipo se baseia na grande quantidade de desafios que devem ser levados em consideração para o compartilhamento de infraestrutura de rede. RAN *sharing* é, do ponto de vista contratual e técnico, muito complexo; a partilha de rede pode demorar meses para ser concluída em forma de contrato, e mais tempo ainda para a implementação de fato. É importante, para as MNOs, identificar os cenários de investimento em conjunto e analisar as alternativas que contribuam para ambas as partes [7]. Este trabalho, portanto, realiza uma investigação do tipo com relação ao compartilhamento de rede no LTE, analisando o impacto de decisões relacionadas ao tipo de serviço oferecido por cada operadora.

Objetivos

Considerando o problema de compartilhamento de RAN descrito, são metas deste trabalho:

- Apresentar a estrutura da tecnologia LTE com relação à sua padronização, arquitetura e protocolos, e em especial, a possibilidade de RAN *sharing* já padronizada pelo 3GPP;

- Agrupar as características do LTE importantes para o contexto de compartilhamento do acesso aos recursos de rádio entre duas operadoras, e desenvolver modelos de implementação para cada particularidade;
- Desenvolver um simulador simplificado que envolva as características catalogadas no item anterior, utilizando os modelos de implementação elaborados;
- Investigar os possíveis cenários de compartilhamento de espectro entre duas entidades que utilizam a tecnologia, considerando modelos de tráfego factíveis;
- Simular os diferentes cenários de RAN *sharing* no software concebido, e encontrar resultados em formato gráfico;
- Explorar os resultados enfatizando a probabilidade de prejuízos ou lucros para duas MNOs que compartilham RAN, em termos financeiros.

Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho está composta por três partes. A parte I descreve de modo geral a tecnologia LTE em relação à sua estrutura física, de acordo com um embasamento teórico. Mais especificamente, introduz os conceitos do LTE de acordo com sua padronização, os requisitos e tecnologias; resume um pouco de sua arquitetura de rede, tanto no plano de controle como no plano do usuário; trata dos conceitos relacionados à sua camada física; aborda sobre o gerenciamento de recursos de rádio, enfatizando os parâmetros de auxílio ao escalonamento dinâmico de recursos; e finalmente, relata as arquiteturas de compartilhamento contidas na padronização do 3GPP.

Na parte II, está reproduzida toda a base do simulador implementado. Após as justificativas de algumas simplificações realizadas, o texto narra a modelagem do sistema implantado em software, os procedimentos descritos na norma do 3GPP [10] relacionada a procedimentos na camada física, os modelos de tráfego utilizados e o algoritmo de escalonamento de recursos utilizado para a simulação.

Por fim, na parte III, são apresentados os resultados e conclusões obtidos após a simulação do contexto de compartilhamento de RAN, em formato gráfico, além de algumas análises técnicas enfatizando o efeito do cenário no âmbito financeiro.

Parte I

Fundamentação Teórica

1 *Long Term Evolution*: visão geral

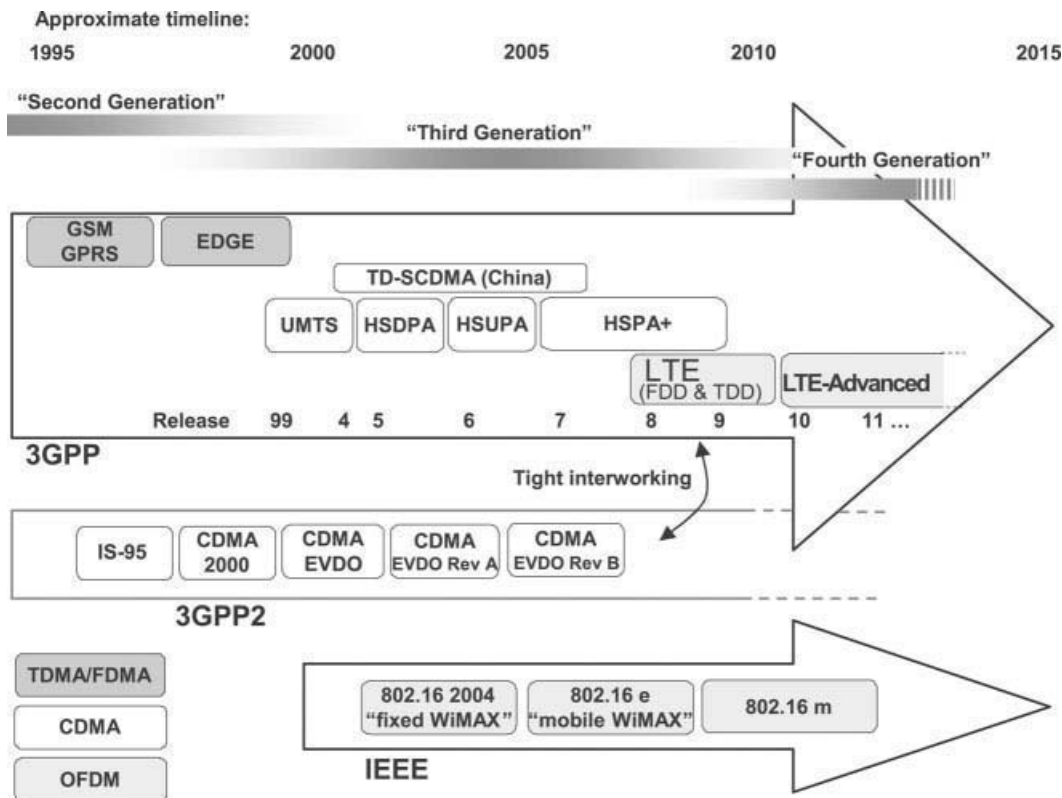
1.1 3GPP e Padronização do LTE

O setor de comunicações sem fio testemunhou um vasto avanço nas últimas décadas, com o extenso crescimento em termos de número de usuários e desenvolvimento de tecnologia. Tradicionalmente visto como uma sequência sucessiva de gerações, esse desenvolvimento partiu da telefonia analógica, dita de primeira geração, à digital, representada pelas gerações posteriores. O LTE é um dos últimos avanços alcançados no que diz respeito às comunicações móveis; comercialmente, já é tratado como uma telefonia de quarta geração (4G). Assim como outras tecnologias que utilizam o espectro de rádio, é regulamentada e padronizada.

A ITU (*International Telecommunication Union*), órgão regulador do setor de telecomunicações a nível global, define as famílias de tecnologias e coordena a associação de diferentes partes do espectro para cada uma, considerando que essas são potencialmente interferentes. Para as tecnologias móveis, a família é denominada *International Mobile Telecommunications* (IMT), que compreende os sistemas a partir de terceira geração. Sob o ângulo de padronização, três organizações principais desenvolvem diferentes tecnologias para as requisições do IMT. Uma representação desse conjunto de tecnologias das comunicações móveis até o 4G pode ser vista na Figura 1 ¹.

O órgão que padroniza o LTE é o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), uma associação entre diferentes empresas do setor de telecomunicações. Sua evolução é mostrada na parte superior da figura, e compreende desde o GSM (*Global System for Mobile Communications*), GPRS (*General packet radio service*) e EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*), tecnologias de segunda geração, passando pela família UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*)/HSPA (*High-Speed Packet Access*)/HSPA+ (terceira geração), até o LTE. Paralelamente, o 3GPP2 (*3rd Generation Partnership Project 2*) e o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) padronizam outras tecnologias, em alguns casos semelhantes e potencialmente interferentes entre si, como é o caso do WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e o LTE, ambas utilizando o OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) [1]. Estas tecnologias eram as principais concorrentes do cenário 4G, até que o WiMAX foi gradualmente excluído do mercado, por opção comercial – o LTE possui a vantagem de ser compatível com as redes existentes nas redes 3G e 2G, de forma que as operadoras podem transitar com maior facilidade à esta tecnologia.

¹ Figura retirada de [1].



10 ms para transferências de pacotes. Baixas latências para o *handover* e tempo de conexão também são requeridas.

- Utilização flexível do espectro: Embora a ITU se esforce para padronizar a atribuição de faixas de frequências no mundo, muitas das bandas de frequência utilizadas nos países não são iguais. Dessa forma, uma característica do LTE é a operação em várias faixas de frequência (900 MHz, 1800 MHz, 700 MHz e 2,6 GHz) com cinco possíveis larguras de banda: 1,4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz. Isso garante flexibilidade para a utilização do LTE pelo mundo. Além disso, a tecnologia deve suportar duas formas de multiplexação: FDD (Multiplexação por Divisão de Frequência) e TDD (Multiplexação por Divisão de Tempo) para acomodar espectro tanto pareado como não pareado.
- Custo reduzido por Megabyte: é essencial, devido à requisição de baixos preços de mercado, que o LTE garanta substanciais reduções de custos de rede para enviar dados aos usuários finais. Essa redução de custos é diretamente interligada com a eficiência espectral, que deve ser de 1,6-2,1 bps/Hz/célula e 0,66-1,0 bps/Hz/célula para o *downlink* e *uplink*, respectivamente.
- Mobilidade: LTE deve ter suporte para comunicação com terminais móveis com velocidade superiores a 350 km/h ou até 500 km/h dependendo da banda de frequência. Com essa requisição, o *handover* entre células é possível sem interrupção em cenários antigamente improváveis como trens de alta velocidade.
- Capacidade para serviço de voz: diferentemente de outros tipos de tráfego que são tolerantes a *delay*, o serviço de voz na categoria de tempo real como o VoIP (*Voice over IP*) tem limitações em termos de *delay*. Dessa forma, o LTE deve garantir o QoS (Qualidade de Serviço) requerido por este serviço.

1.3 Tecnologias para o LTE

1.3.1 Tecnologia de Multiportadora e Acesso Múltiplo

Para garantir os requisitos estabelecidos, o primeiro passo importante para o acesso múltiplo no LTE foi a escolha de uma abordagem multi-portadora. O OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) foi eleito (para o *downlink*) por estender essa tecnologia de múltiplos portadores do OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), de forma a fornecer um esquema muito flexível. O OFDM subdivide a largura de banda disponível para transmissão em várias subportadoras de largura de banda estreita, que, dispostas ortogonalmente, podem transportar grandes fluxos de dados. No OFDMA, a divisão da largura de banda pode ser explorada para compartilhar os recursos entre

múltiplos usuários – é possível organizar e configurar os recursos de rádio a partir de um *grid* tempo-frequência, como mostra a Figura 2³.

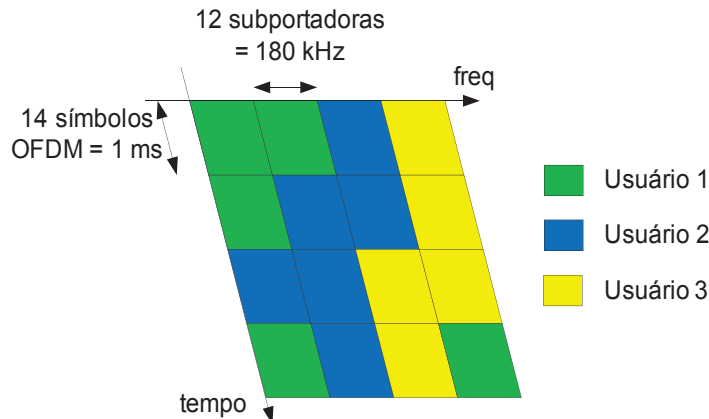


Figura 2 – Exemplo de múltiplo acesso em recursos de rádio no LTE. Fonte: *Tecnologias de camada física e MAC para redes LTE* [2].

Como resultado da utilização dessa tecnologia, (i) a coordenação de interferência entre as células é facilitada; (ii) a robustez dos canais de rádio devido à divisão da largura de banda em várias subportadoras é elevada; (iii) os receptores tem baixa complexidade; (iv) o escalonamento pode ser realizado livremente no domínio da frequência; (v) várias larguras de banda podem ser utilizadas sem a alteração dos parâmetros do sistema ou do design dos equipamentos [1].

Por outro lado, como a PAPR (*peak-to-average power ratio*) do OFDMA é alta, essa tecnologia não é utilizada no *uplink*, e sim uma variação denominada SC-FDMA (*Single-carrier FDMA*), que tem uma PAPR consideravelmente baixa em relação à estratégia utilizada no *downlink*.

No capítulo 3, será apresentada de forma mais detalhada a tecnologia de múltiplo acesso do LTE.

1.3.2 Técnicas de Múltiplas Antenas

A taxa máxima alcançável pelo LTE, teoricamente, é 300 Mbps para o *downlink* e 75 Mpps para o *uplink*. Esses valores de *throughput* são estabelecidos na padronização incorporando múltiplas antenas, ou a técnica MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Na transmissão OFDM, cada antena utiliza um grid de recursos, e podem transmitir o sinal independentemente. A transmissão com múltiplas antenas pode ser utilizada de três formas principais [1][12]:

³ Figura retirada de [2].

- Diversidade de transmissão: o uso da tecnologia pode prover robustez de transmissão com relação ao desvanecimento provocado pelos multipercursos;
- Ganho de potência: a concentração de múltiplas antenas na mesma direção, em casos onde é difícil alcançar uma boa SNR (Relação Sinal-Ruído) naturalmente;
- Multiplexação espacial: a transmissão de múltiplos sinais para um usuário de cada uma das múltiplas antenas transmissoras.

Um canal MIMO consiste em ganhos de canal e informação de fase para enlaces de cada uma das antenas transmissoras para cada uma das antenas receptoras, como mostra a Figura 3⁴. Em modelo matemático, um sistema MIMO $M \times N$ é dado pela matriz $N \times M$:

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,M} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1} & h_{N,2} & \cdots & h_{N,M} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

onde h_{ij} representa o ganho do canal para transmissão da antena j para a antena receptora i [3]. Em um sistema MIMO de malha aberta, a relação entre o vetor de símbolos no receptor $y = [y_1 y_2 \dots y_N]^T$ e o vetor de símbolos transmitidos $x = [x_1 x_2 \dots x_M]^T$ é

$$y = Hx + n, \quad (1.2)$$

onde n é o vetor $N \times 1$ que representa a interferência do ruído no canal.

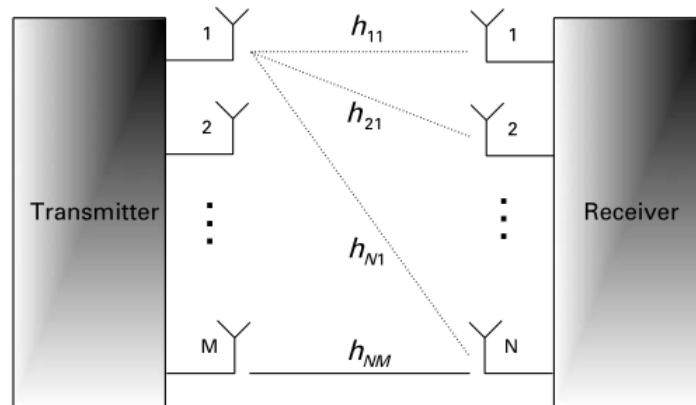


Figura 3 – Representação de um sistema MIMO $M \times N$. Fonte: *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance* [3].

⁴ Figura retirada de [3]

2 Arquitetura de rede

2.1 Visão global

A Arquitetura do LTE foi desenvolvida para suportar serviços de comutação de pacotes, em oposição às tecnologias móveis anteriores que utilizam comutação de circuitos. Com isso, o EPS (*Evolved Packet System*), o sistema que compreende o LTE (evolução do acesso de rádio) e o *System Architecture Evolution* – SAE (evolução dos aspectos da arquitetura que complementam o acesso de rádio, o núcleo da rede), pode fornecer conectividade IP contínua entre o equipamento do usuário e o PDN (*Packet Data Network*), a rede de pacotes de dados [1] [13].

Na Figura (4), é mostrada a arquitetura geral do EPS¹. O sistema compreende os seguintes elementos:

Equipamento do usuário (UE, *User Equipment*): dispositivo com o qual o usuário acessa a rede.

E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*): Consiste em uma rede de ENodeBs (as estações base), possuindo a camada física (PHY, *physical layer*), camada MAC (*Medium Access Control*) e camada de controle de rádio (RLC, *Radio Link Control*). Inclui ainda outras funcionalidades (alocação dinâmica de recursos e escalonamento), englobando de uma maneira geral a gestão de recursos de rádio (RRM, *Radio Resource Management*).

EPC (*Evolved Packet Core*): o núcleo da rede, onde estão contidos os elementos que garantem a conexão dos ENodeBs com os serviços das operadoras; alguns de seus elementos principais são:

***Serving Gateway* (S-GW):** Faz o roteamento dos pacotes de dados, além de outras funções administrativas, como coleta de informações de cobrança. Além do LTE, administra também informações em paralelo de outras tecnologias 3GPP.

***PDN Gateway* (P-GW):** aloca endereços IP para os usuários. Faz o roteamento entre o EPC e os serviços externos.

***Mobility Management Entity* (MME):** é o nó de controle, que processa os sinais entre o equipamento do usuário e o EPC. Gerencia o estabelecimento de conexão e segurança.

¹ Imagem adaptada de [1].

Policy Control Enforcement Function (PCRF): Elemento da rede cuja função é fornecer o QoS adequado. Engloba decisões de política de controle.

Home Subscriber Server (HSS): contém as informações de registro do usuário, como perfis de QoS, restrição de acesso e recursos de *roaming*.

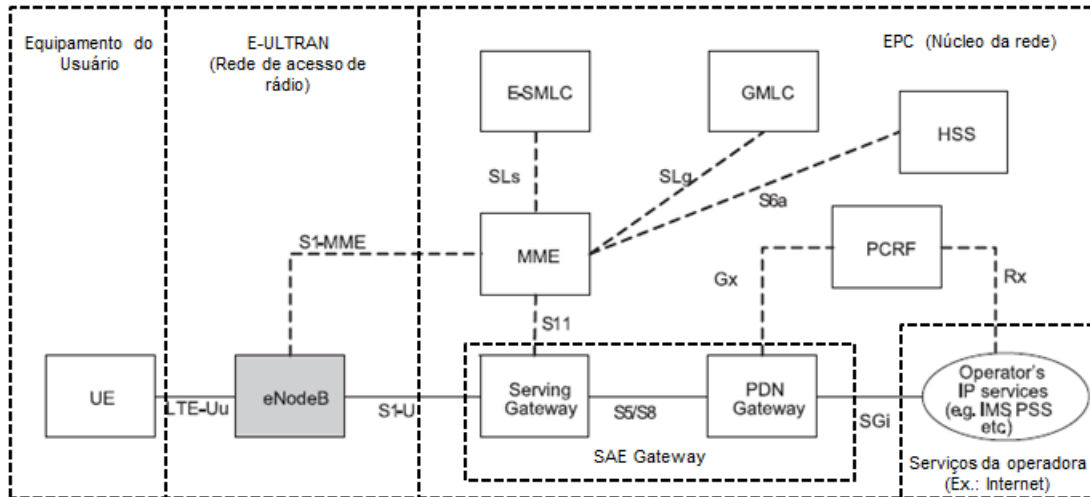


Figura 4 – Elementos do EPS – arquitetura de rede de rádio (LTE) e do núcleo da rede (EPC). Adaptado de: *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice* [1].

2.2 Arquitetura de Protocolos

A interface de rádio no LTE é caracterizada através de seus protocolos, que são definidos em dois grupos principais: os protocolos no plano de controle e no plano do usuário. O plano de controle é responsável pelo controle de conexão entre o UE e a rede, enquanto o plano de usuário transporta os dados através da camada de acesso. Ainda que a separação entre o plano de controle e o plano do usuário seja uma questão importante no projeto do LTE, a total independência das camadas não é viável, pois a interação entre os dois planos provê o controle de QoS, a origem de destino do tráfego, e os instantes em que o tráfego se inicia ou para [14].

Na Figura 5, é apresentada a pilha de protocolos nos dois planos ². O plano do usuário consiste nas camadas PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), RLC (*Radio Link Control*) e MAC (*Medium Access Control*), que terminam no eNodeB, no lado da rede.

No plano de controle, as camadas iguais desempenham a mesma função que no plano de usuário, com exceção de não haver compressão de cabeçalho. O protocolo *Radio Resource Control* (RRC) é conhecido como ‘camada 3’, e é responsável por estabelecer os

² Figuras retiradas de [3].

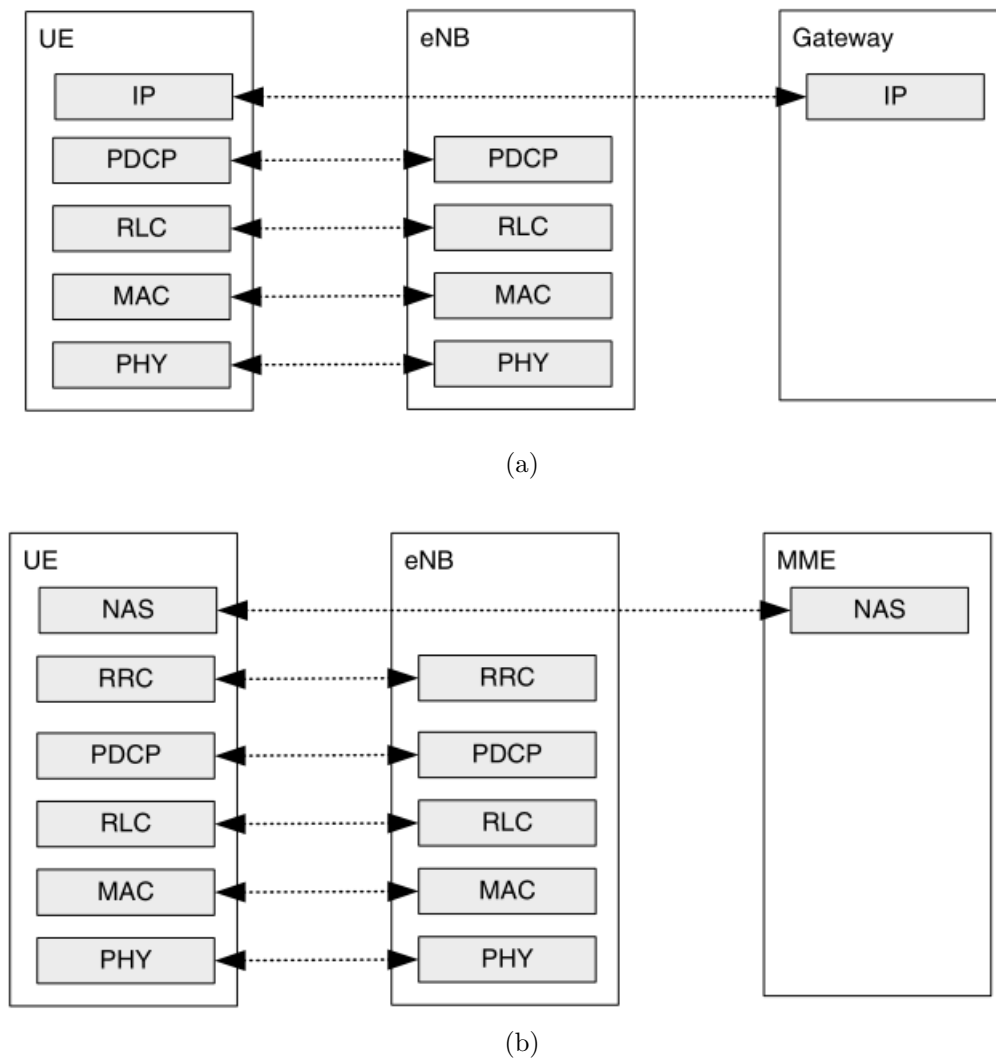


Figura 5 – Pilha de protocolos (a) no plano do usuário e (b) no plano de controle. Fonte: *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance* [3].

radio beares (conexão lógica que transporta dados ao UE) e configurar todas as camadas inferiores utilizando sinalizações RRC entre o UE e o eNodeB. A descrição das principais camadas é apresentada mais adiante.

2.2.1 Controle de Recursos de Rádio (RRC)

Segundo [1], o plano de controle, o *Access Stratum* (AS) é uma camada funcional responsável pelo transporte de dados através da conexão sem fio e pelo gerenciamento de recursos de rádio. O procedimento do AS depende do estado do UE, que pode ser RRC_IDLE ou RRC_CONNECTED.

O primeiro realiza a seleção e re-seleção de células (decisão sobre qual célula estabilizar-se) – ou seja o usuário ainda está desconectado e não utiliza um serviço. O segundo é responsável por alocar recursos de rádio ao UE para prover a transferência de

dados via canais físicos. Para suportar essa operação, o UE monitora o canal de controle associado utilizado para indicar a alocação dinâmica da transmissão compartilhada em tempo e frequência.

O protocolo RRC suporta a transferência de informação NAS (*Non-access stratum* – a camada funcional superior ao RRC, entre o UE e o MME) comum, como as que são aplicáveis para todos os UE, assim como a transferência de informação NAS dedicada, aplicável somente para um UE específico. Além disso, RRC suporta notificação via *paging* para UEs no estado RRC_IDLE.

Mensagens RRC dedicadas são transmitidas através de *Signalling Radio Bearers* (SRBs) e mapeados em canais lógicos através das camadas PDCP e RLC, como o *Common Control CHannel* (CCCH) durante o estabelecimento da conexão ou o *Dedicated Control CHannel* (DCCH) no estado RRC_CONNECTED. A Figura 6 apresenta de forma geral a arquitetura de rádio do LTE³. Nota-se que a camada RRC é responsável por prover tanto notificações, via *Paging*, quanto informação NAS.

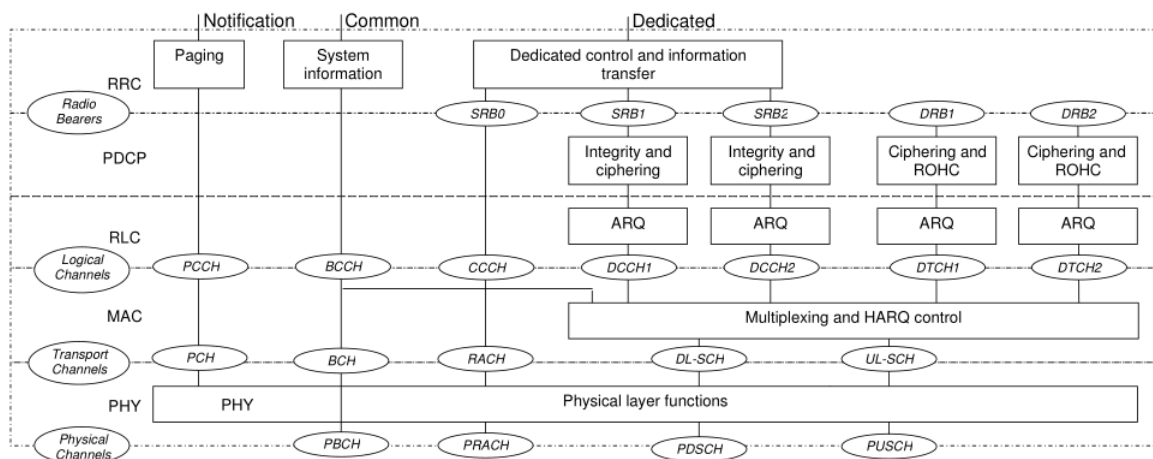


Figura 6 – Arquitetura geral de rádio do LTE, apresentando tanto as camadas como os canais/bearers. Fonte: *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice* [1].

2.2.2 Protocolo de Convergência de Pacotes de dados (PDCP)

A camada PDCP transporta informações tanto no plano de controle quanto no plano do usuário, e pode ser configurada para a utilização de compressão de cabeçalho. Em geral, essa camada suporta as seguintes funções [1] [14]:

- Compressão e descompressão de cabeçalhos: a principal tarefa é a compressão de informações de controle redundantes, como os cabeçalhos do TCP/IP ou RTP/UDP. O método de compressão é diferente para a camada inferior ou camadas superiores.

³ Figura retirada de [1].

- Segurança: encriptação e decryptação, além da proteção de integridade;
- Funções de *Handover*: entrega sequencial e mapeamento dos dados no plano do usuário, quando ocorre *handover*;
- Descarte de dados no plano do usuário devido ao *timeout*.

2.2.3 Controle do Enlace de Rádio (RLC)

No lado da transmissão, uma camada X recebe dados de uma camada $X + 1$ e estes dados são chamados de SDUs (*Service Data Unit*). Esta camada, então, modificará e converterá os dados em outra estrutura, chamada PDU (*Protocol Data Unit*).

O RLC é uma subcamada entre o PDCP e a camada MAC. Tanto RLC quanto MAC fazem parte da chamada ‘camada 2’. A camada RLC se comunica ao PDCP através do *Service Access Point* (SAP), e à camada MAC via canais lógicos. Essa camada reformata os PDUs recebidos de PDCP para encaixá-los no tamanho indicado pela camada MAC [14].

Além disso, é responsável pela correção de erros via ARQ (*Automatic Repeat Request*). No ARQ, quando um pacote é recebido errado, o sistema simplesmente o descarta e pede uma retransmissão de pacote, através de mensagens chamadas *ACKnowledgement* (ACK) e *Non-ACKnowledgement* (NACK), para informar uma boa ou má transmissão, respectivamente.

O método é utilizado somente em um regime especial, para não sobrecarregar a transmissão de dados; um esquema mais aprimorado de retransmissão é utilizado na camada MAC (*Hybrid ARQ*) [1] .

2.2.4 Medium Access Control (MAC)

Como visto na Figura 6, a camada MAC tem a função de multiplexação e controle de HARQ. O HARQ é a utilização do ARQ em conjunto com uma técnica de correção erros que não descarta os dados recebidos. Nesse caso, os pacotes não decodificados corretamente são armazenados e combinados com sua retransmissão. Assim, dois pacotes que errados podem ser combinados de tal modo que a mensagem possa ser decodificada.

Na Figura 7, retirada de [1], é apresentada a arquitetura da camada MAC de forma mais detalhada. Além do HARQ e da entidade de multiplexação/demultiplexação, a camada MAC consiste em uma entidade de controle que desempenha funções variadas.

No bloco de multiplexação, os dados dos canais lógicos são multiplexados para um canal de transporte. A demultiplexação realiza o mesmo mapeamento no sentido inverso. A entidade de priorização de canais lógicos decide a quantidade de dados desses canais

devem ser incluídos em cada PDU da camada MAC. Essas decisões são enviadas para multiplexação.

O controle de acesso randômico controla o Canal de Acesso Randômico (RACH, *Random Access CHannel*), e é responsável por várias funções, que incluem a recepção descontínua (DRX, *Discontinuous Reception*), o procedimento de escalonamento de dados, entre outras.

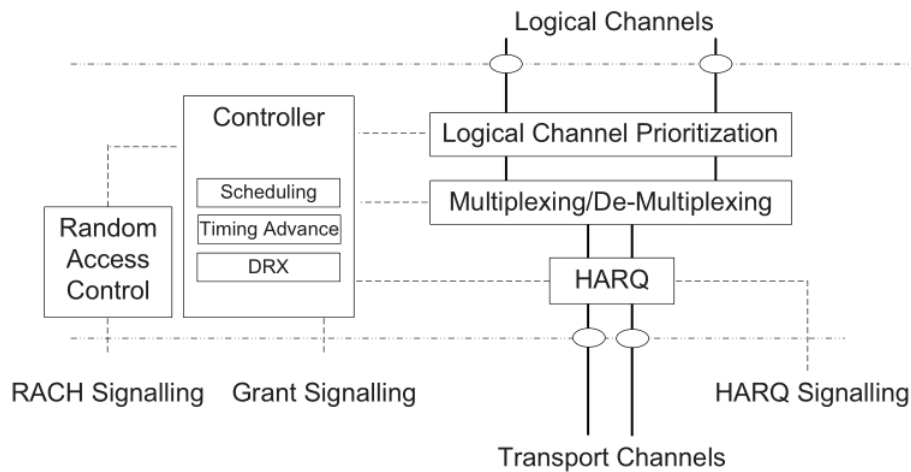


Figura 7 – Arquitetura geral apresentando as funções da camada MAC. Fonte: *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice* [1].

3 Camada Física

3.1 Acesso múltiplo

A escolha de uma técnica de modulação e múltiplo acesso para um sistema de comunicação móvel é decisivo para seu bom desempenho. O método tradicional para transmissão e recepção de múltiplos sinais constitui-se na divisão em frequência dos diversos sinais, com espaçamento tal que seja possível discriminá-los utilizando um simples filtro passa-faixa, como mostrado na Figura 8.

Como mencionado anteriormente, o OFDM, em oposição às tecnologias de multiplexação clássicas, utiliza várias subportadoras de banda estreita, sobrepostas mas ortogonais entre si. Dessa forma, evita-se a necessidade de separar os sinais selecionando-os individualmente com um filtro; a própria característica de ortogonalidade é suficiente para cumprir essa tarefa [1].

Dispensando-se a obrigação de evitar interferências entre as portadoras, é possível tornar o espectro mais eficiente, economizando-o consideravelmente, como pode ser visto na Figura 9. Na Figura 10, é representada a ortogonalidade entre os sinais; nota-se que o espaçamento entre as subportadoras é adaptado de forma que se iguale à frequência de símbolo. Dessa forma, se pode gerar um sinal absoluto com alta taxa de dados (representado na figura pela envoltória de banda larga) a partir de vários sinais de baixa taxa de dados, diminuindo a complexidade do sistema de transmissão [2].

Sabe-se que, da teoria de sinais e sistemas, senóides da Transformada Discreta de Fourier (DFT) formam uma conjunto de bases ortogonais, e um sinal no espaço vetorial da DFT pode ser representada como uma combinação linear das senóides ortogonais. Além disso, a DFT é uma transformação que essencialmente correlaciona o sinal de entrada com cada uma de suas funções base – se o sinal tem energia a uma certa frequência, haverá um pico na correlação entre o sinal de entrada e a base senoidal que representa essa frequência. Portanto, DFT (ou na realidade, o algoritmo que a computa – FFT, *Fast Fourier Transform*) é utilizada no transmissor OFDM para mapear um sinal para um conjunto de subportadoras ortogonais. Do mesmo modo, é fácil supor que no receptor a transformação inversa é utilizada para processar a informação recebida [14].

Na Figura 11, é possível ver a implementação digital simplificada do transmissor e receptor OFDM ¹. Os símbolos complexos $X(k)$ paralelizados antes do mapeamento na constelação são processados com a inversa IFFT (utilizada no transmissor por uma simples convenção de sinal); alguns pontos sem informação são transmitidos como subportadoras

¹ Figura retirada de [3].

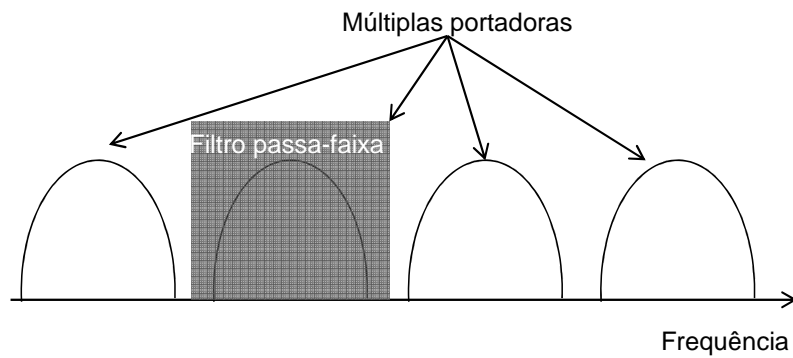


Figura 8 – Método tradicional de transporte de múltiplas portadoras: o receptor seleciona cada portadora individualmente a partir de um filtro passa faixa.

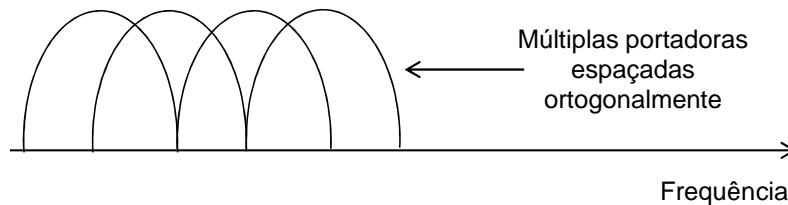


Figura 9 – Método de transporte de informação utilizando o OFDM, provendo economia de banda.

de guarda. O sinal então é novamente convertido em serial e um prefixo cíclico é adicionado depois da IFFT. O resultado da operação é transferido à banda passante (*up-conversion*), amplificado e transmitido. No transmissor, ocorrem as operações inversas.

Na tecnologia LTE, o *downlink* e o *uplink* baseiam o acesso múltiplo em métodos associados ao OFDM, embora haja algumas diferenças; no *downlink*, a modulação/multiplexação OFDMA sustenta o sistema de transmissão para múltiplos usuários, enquanto o SC-FDMA é utilizado no *uplink*. Entretanto, esta tecnologia nada mais é do que uma simples modificação do OFDMA, o que permite que muitos pontos que são válidos para o *downlink* sejam válidos também para o *uplink* [15].

A esquema OFDM é utilizado em várias tecnologias, como WLAN (*wireless local area network*), WiMAX, entre outras; com base nisso, existem vários estudos relacionando a utilização da mesma tecnologia em sistemas diferentes, com o objetivo de analisar qualquer interferência mútua em um possível compartilhamento físico.

3.1.1 OFDMA (*downlink*)

O OFDMA é uma extensão do OFDM para um sistema de múltiplo acesso, onde são alocadas subportadoras no espaço tempo-frequência a diferentes usuários. Isso quer

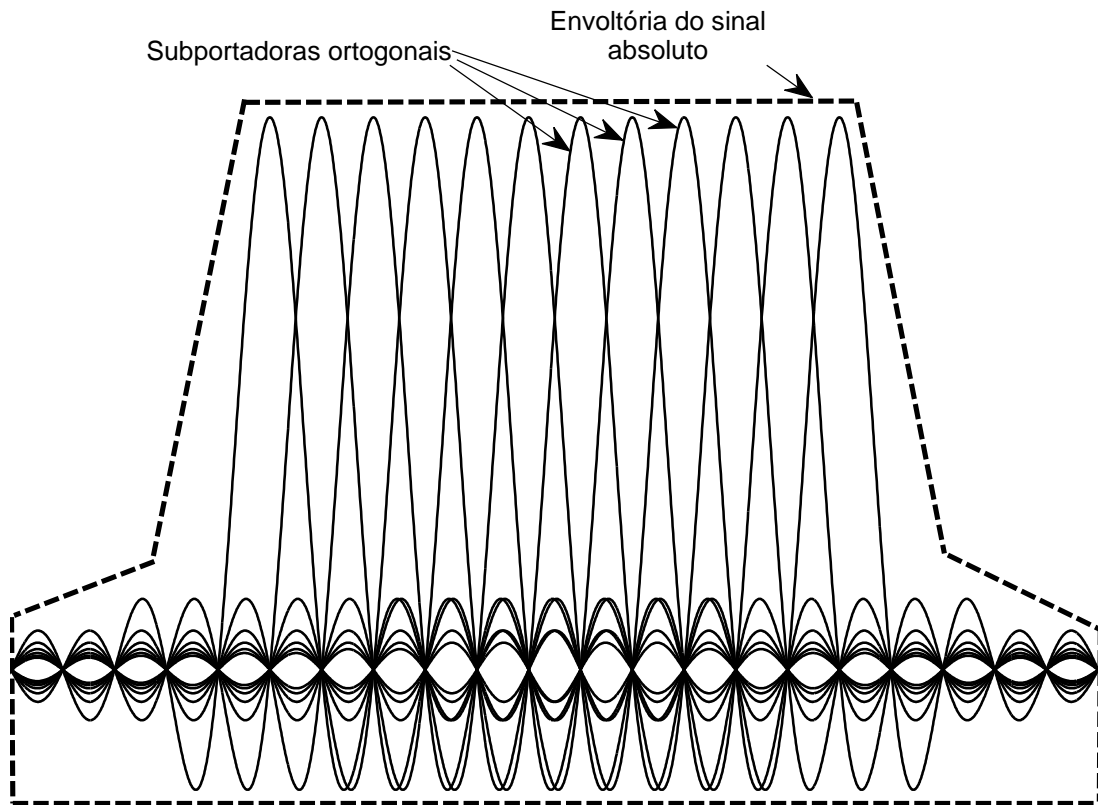


Figura 10 – Representação gráfica da ortogonalidade entre os sinais de banda estreita (subportadoras), formando um sinal de banda larga (envoltória).

dizer, basicamente, que em um mesmo período múltiplos usuários compartilham a largura de banda disponível. Como mencionado anteriormente, a camada física do *downlink* do LTE é baseada no OFDMA, que aloca elementos de recurso (*Resource Element* – RE) dado por um par (frequência, tempo) para os usuários.

Vários REs, a menor estrutura de recurso, são agregados em *Resource Blocks* (RB); cada RB é composto, usualmente, de 7 símbolos no domínio do tempo por 12 subportadoras no domínio da frequência. Na Figura 12, pode-se ver esse *grid* de recursos. A distância entre cada subportadora é de 15 kHz, o que provê 180 kHz para cada RB.

Cada intervalo de tempo de transmissão compreende dois *slots* – dessa forma, a menor unidade de recurso alocada para um usuário é composta de dois *slots*, e portanto, dois RBs. Entretanto, pode-se reservar mais RB para um usuário, o que incrementa sua velocidade de transmissão. A alocação de uma certa quantidade de recursos e o período no qual ocorrerá essa alocação obedece critérios do escalonador, uma entidade responsável por executar algoritmos de alocação. O formato do algoritmo depende das medidas de desempenho almejadas para o sistema.

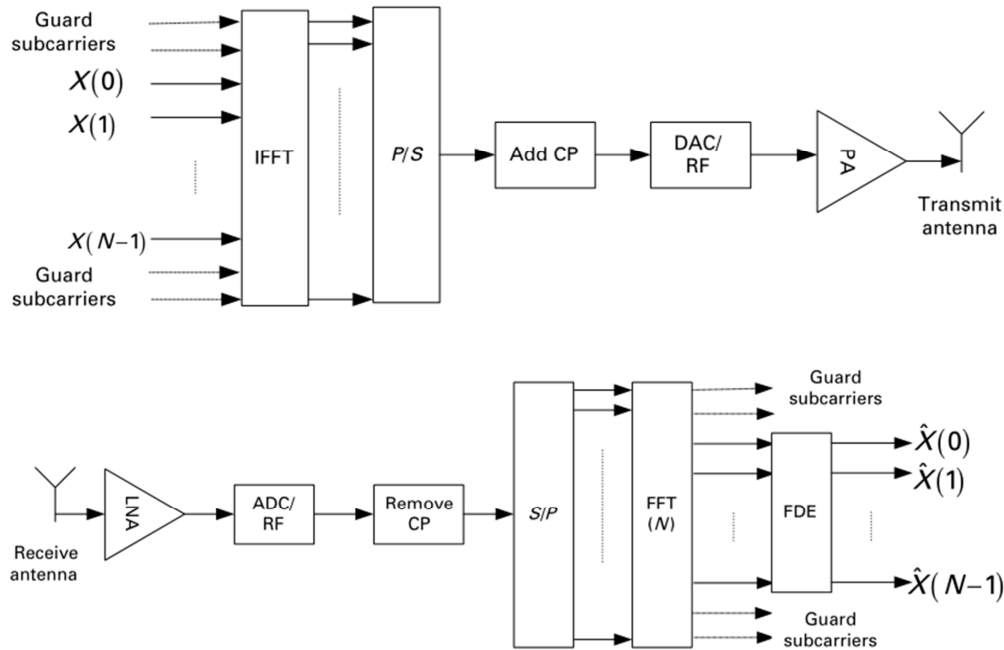


Figura 11 – Esquema de transmissão e recepção OFDM. Fonte: *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance* [3].

3.1.2 SC-FDMA (*uplink*)

O OFDMA, embora tenha muitas vantagens, tem a inconveniência da alta sensibilidade ao *offset* de frequência e um alto PAPR, o fator que relaciona a potência de pico com a energia média.

Em geral, o *uplink* é utilizado com menos frequência que o *downlink*, o que levou ao LTE utilizar uma única portadora FDMA – SC-FDMA, reduzindo o PAPR.

À diferença do OFDMA, que modula cada subportadora de forma independente, no SC-FDMA o sinal modulado é uma combinação linear de todos os símbolos transmitidos em um dado instante de tempo, resultando em uma só portadora, e designando para o *uplink* um baixo PAPR em relação ao *downlink*. Na Figura 13, pode-se ver uma comparação entre os modos de operação do *downlink* e do *uplink*; no primeiro, cada subportadora transporta dados independentemente de outra, o que permite alocar subportadoras adjacentes para usuários diferentes. Em oposição, na operação do *uplink*, a informação é espalhada sobre múltiplas portadoras, de forma que os símbolos ocupem uma banda maior. Dessa forma, enquanto no OFDMA cada símbolo ocupa 15 kHz de frequência (uma subportadora) em um período, no SC-FDMA um símbolo ocupa $n \times 15$ kHz, onde n é a quantidade de símbolos, em um período/ n de símbolo.

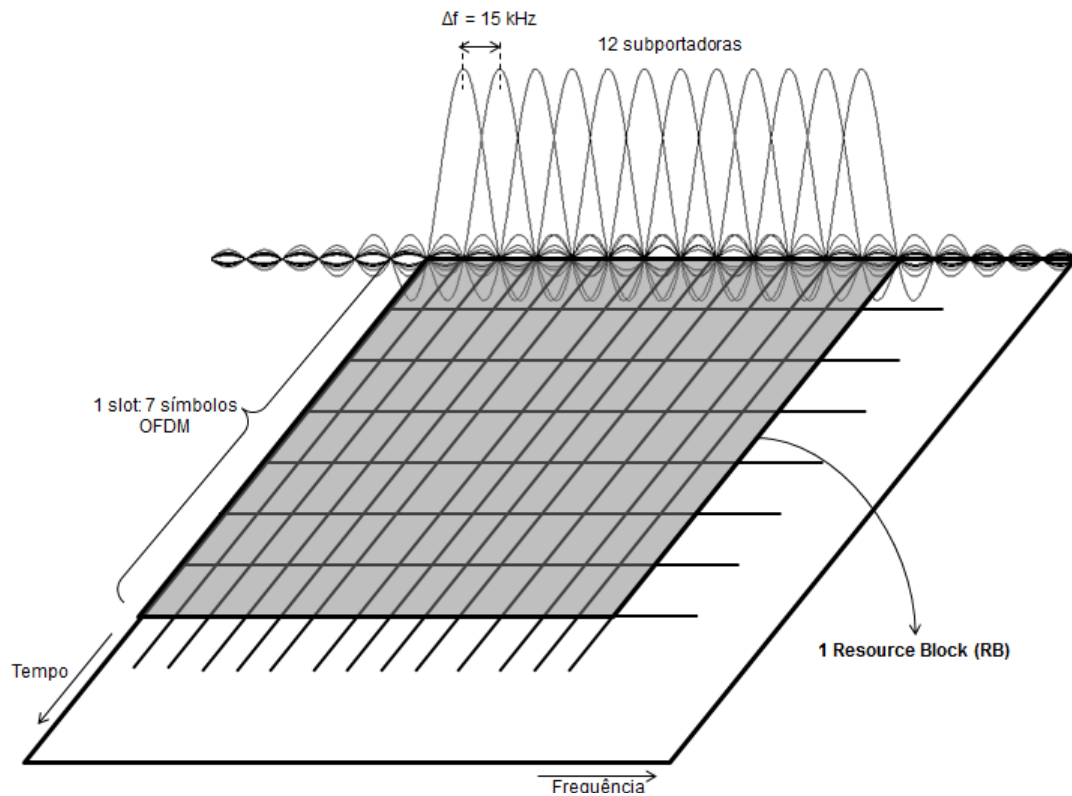


Figura 12 – *Resource Block* no espaço tempo-frequência.

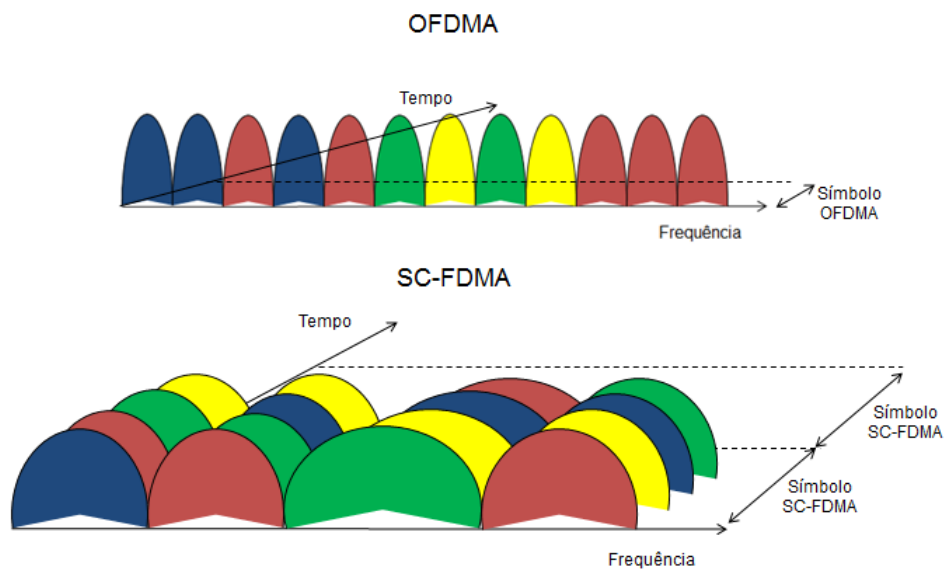


Figura 13 – Comparação entre o OFDMA e o SC-FDMA, em relação à modulação de informação.

3.2 Parâmetros da Camada Física

Dois tipos de duplexação são admitidos no LTE: o FDD e o TDD.

No domínio do tempo, a estrutura de um *frame* no tipo FDD pode ser vista na Figura 14. A duração dos *frames* são de 10 ms, os quais são divididos em 10 *subframes*

de 1 ms [16]. Em cada *subframe*, se compõem 2 *slots* de 0,5 ms cada, divididos ainda em 7 símbolos (no modo normal de prefixo cíclico) ou 6 símbolos OFDM (com prefixo cíclico estendido).

No modo TDD, existe também a divisão em *half frames*, com 5 ms cada; cada *frame* contém ao menos um *subframe* especial, com três informações de comutação: DwPTS (*Downlink Pilot Time Slot*), GP (período de guarda) e UpPTS (*Uplink Pilot Time Slot*).

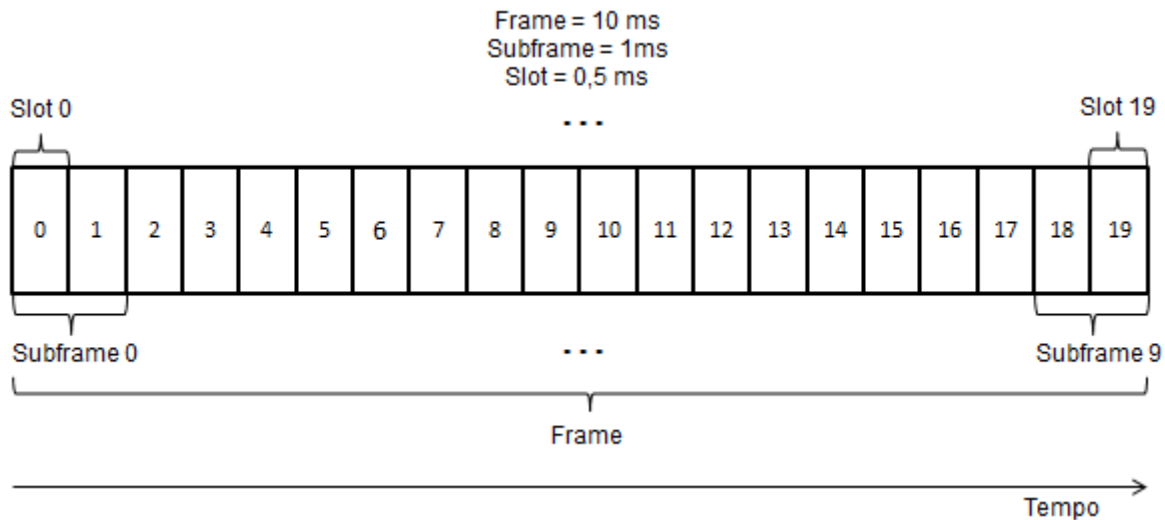


Figura 14 – Estrutura de um *frame* no LTE, com duplexação FDD.

No domínio da frequência, o LTE aceita as seguintes larguras de banda:

- 1,25 MHz: capacidade de 6 *resource blocks*.
- 2,5 MHz: capacidade de 12 *resource blocks*.
- 5 MHz: capacidade de 25 *resource blocks*.
- 10 MHz: capacidade de 50 *resource blocks*.
- 15 MHz: capacidade de 75 *resource blocks*.
- 20 MHz: capacidade de 100 *resource blocks*.

Como um RB consiste em 12 subportadoras espaçadas de 15 kHz cada, a mínima largura de banda atribuída para um usuário é 180 kHz.

3.3 Canais Físicos

Muitos canais dedicados foram especificados pelos padrões 3GPP nas tecnologias 3G foram substituídos por canais compartilhados, *shared channels*, para que o número de canais físicos fosse reduzido.

Nas camadas superiores, os canais lógicos representam a transferência de dados e conexões entre a camada RLC e a camada MAC. O LTE define dois tipos de canais lógicos: de tráfego e de controle. Enquanto os canais lógicos de tráfego transferem dados no plano do usuário, os outros transferem informações no plano de controle.

Canais de Transporte conectam a camada MAC à camada física e os canais físicos são processados pelo transceptor até a camada PHY. Cada canal físico é especificado por um conjunto de elementos de recurso que transferem informação das camadas mais altas para a interface de rádio. A seguir, cada canal físico é apresentado com suas respectivas funções [1].

3.3.1 Downlink

- *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH): o PDSCH é o principal canal de transporte de dados, que são multiplexados espacialmente e mapeados para símbolos modulados que utilizam QPSK, 16-QAM, e 64-QAM. Os RB associados são modulados via OFDMA.
- *Physical Broadcast Channel* (PBCH): transporta um certo número de parâmetros essenciais para o acesso inicial da célula, utilizando a modulação QPSK.
- *Physical Control Format Indicator Channel* (PCFICH): utilizando a modulação QPSK, atualiza o equipamento de telecomunicação móvel em relação à quantidade de símbolos OFDM que será utilizada para o PDSCH em cada subframe. É um canal tipicamente de controle.
- *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH): também com modulação QPSK, envia ao usuário informações sobre a alocação de recursos para o *uplink* e *downlink*.
- *Physical Multicast Channel* (PMCH): transporta informações de multicast, possuindo várias opções de modulação.
- *Reference Signal* (RS): em condições normais, o RS utiliza o primeiro e o quinto símbolo; estima o canal de *downlink* para os usuários.
- *Primary Synchronization* (P-SS) e *Secondary Synchronization Signal* (S-SS): são utilizados para sincronização dos *frames* e solicitar informações.

3.3.2 Uplink

- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH): transporta informações de controle, entre estes, requisições de escalonamento do *uplink*.

- *Physical Random Access Channel* (PRACH): coordena os pedidos de acesso aleatórios para os usuários.
- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH): contém os dados dos usuários.
- *Uplink Reference Signal*: são duas as variações para o sinal; *Demodulation Reference Signal* e *Sounding Reference Signal*. São utilizadas para facilitar a demodulação.

4 Gerenciamento de Recursos de Rádio

De acordo com [4], a função do Gerenciamento de Recursos de Rádio (RRM, *Radio Resource Management*) é garantir que os recursos de rádio sejam utilizados eficientemente, utilizando técnicas de adaptação avançadas, e servindo os usuários de acordo com os parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*) configurados.

Os procedimentos do RRM incluem controle de potência, escalonamento, busca de células, reseleção de células, *handover*, monitoramento do enlace de rádio, e (re)estabelecimento da conexão [1].

O RRM no LTE é, portanto, um conjunto de funções realizadas no enlace entre o eNodeB e o UE, e abrange mais de uma camada. Essas funções são realizadas por algoritmos, e são mostradas na Figura 15¹. Na camada 3, as funções de RRM são caracterizadas por mecanismos semi-dinâmicos, e engloba o gerenciamento de QoS, controle de admissão e escalonamento semi-persistente. Nas camadas 1 e 2, os mecanismos utilizados são chamados de dinâmicos, pois são funções que decidem por novas ações a cada TTI (*Transmission Time Interval*, a quantidade de tempo básica do LTE, referente à um slot), e envolve os algoritmos de HARQ, escalonamento dinâmico, adaptação do enlace e do PDCCH, gerenciamento de CQI (*Channel Quality Indicator*), e o controle de potência [4].

Este capítulo trata das funções de RRM importantes para o desenvolvimento do trabalho.

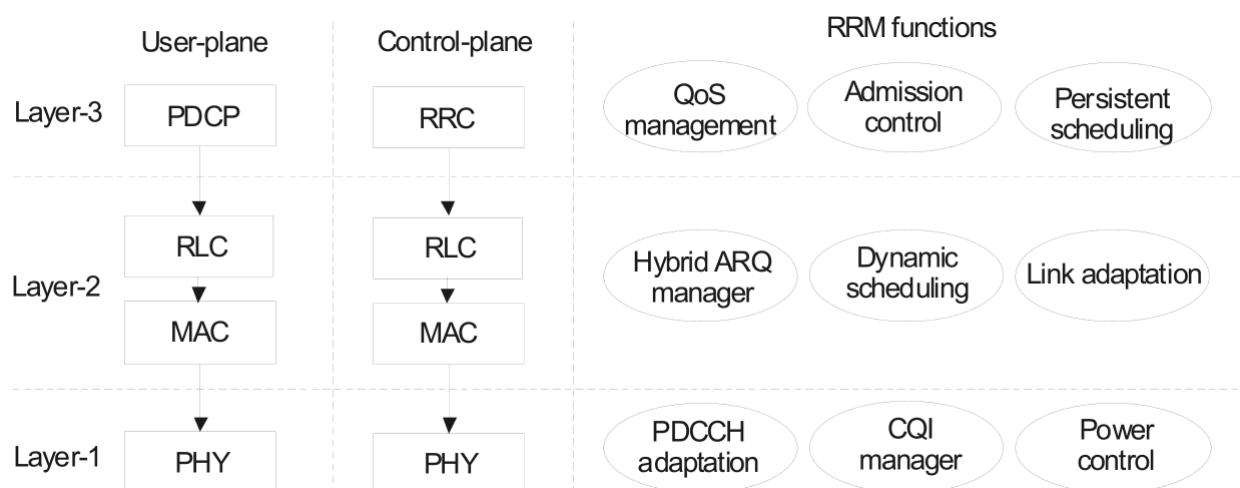


Figura 15 – Mapeamento das principais funcionalidades de RRM nas diferentes camadas, tanto no plano de controle quanto no plano de usuário. Fonte: *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access* [4].

¹ Figura retirada de [4].

4.1 Controle de Admissão e Parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS)

Os algoritmos de controle de admissão no eNodeB decidem sobre aceitar ou não as novas requisições. Para isso, o sistema confere que há recursos suficientes para prover a performance esperada pela qualidade de serviço. Caso os recursos não sejam suficientes o estado do usuário não transita ao RRC_CONNECTED.

Essa situação ocorre frequentemente, e depende do tipo de serviço que o usuário esteja utilizando. Os tipo de serviços tem diferentes requisições para QoS; por exemplo, o usuário pode requerer uma chamada de VoIP enquanto outro usuário tenta conexão para navegação web ou download de um arquivo FTP. O serviço de VoIP tem mais restrições em termos de delay que uma navegação web, enquanto esse outro serviço requer uma baixa perda de pacotes. Os serviços são divididos em duas categorias diferentes:

- *Minimum Guaranteed Bit Rate* (GBR): um serviço GBR tem um escalonamento dedicado de recursos, que são permanentemente alocados. O sistema deve garantir, portanto, uma taxa mínima de transmissão. Na aplicação de VoIP, por exemplo, para garantir que o delay seja baixo, é necessário um valor GBR associado.
- *Non-GBR*: aplicações que não são associadas a nenhum GBR, como navegação web. Para estes, a alocação de recursos depende da disponibilidade de banda.

Para cada serviço é associado um valor QCI (*QoS class identifier*), um escalar utilizado como referência para acessar parâmetros como peso de escalonamento, limiares de admissão, configuração de protocolo da camada de enlace, etc. Indica nove diferentes características de performance para cada pacote IP, como pode ser visto na Tabela 1 ².

4.2 Adaptação do Enlace (*Link Adaptation*)

A qualidade do sinal recebido pelo UE depende da qualidade do canal no enlace, dos níveis de interferência e do ruído. Para otimizar a capacidade do sistema, o transmissor deve tentar adaptar a taxa de dados para cada usuário seguindo as variações na qualidade do canal. Este processo chama-se *Link Adaptation*, ou Adaptação do Enlace, e se baseia no *Adaptive Modulation and Coding* (AMC), que define [1]:

- Esquema de modulação: QPSK, uma modulação de baixa ordem para tornar o enlace robusto à interferências, 16QAM e 64QAM, que podem oferecer maior taxa de transmissão que o primeiro.

² Tabela retirada de [17]

Tabela 1 – Identificadores de classe QoS (QCI) padronizados pelo 3GPP [17].

QCI	Tipo	Prioridade	Delay (ms)	Taxa de erro de Bit	Exemplos
1	GBR	2	100	10^{-2}	Serviços de voz conversacionais
2	GBR	4	150	10^{-3}	Serviços de vídeo conversacional
3	GBR	5	300	10^{-6}	Streaming de vídeo
4	GBR	3	50	10^{-3}	Jogos em tempo real
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Sinalização IMS
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Vídeo e serviços baseados em TCP
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	Voz, Vídeo e jogos interativos
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	Serviços baseados em TCP
9	Non-GBR	9	300	10^{-6}	

- Taxa de código: Para uma dada modulação, a taxa de código pode ser baixa para aumentar a probabilidade de correção de erros se a SNR não é suficiente para transmissão adequada, ou uma taxa de código mais alta se o contrário ocorre. A taxa de código informa quantos bits de redundância para cada bit de informação útil são enviados no enlace.

A adaptação do enlace é baseada nas decisões sobre o relatório do Indicador de Qualidade de Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*) fornecido pelo UE periodicamente ou aperiodicamente. A Tabela 2 mostra os índices CQI definidos pelo 3GPP, e suas respectivas taxas de código, modulação e eficiência (informação útil por símbolo) associadas. O eNodeB toma decisões a partir desse valor, mas pode ou não associar a modulação e taxa de código requerida, dependendo do estado do sistema.

Na figura 16, são apresentados os tipos de relatórios informados pelo UE. Com relação ao tempo, como já dito, os relatórios podem ser periódicos ou aperiódicos; com relação à frequência, os relatórios são divididos em um único relatório para banda larga, ou podem ser enviados relatórios para várias sub-bandas específicas.

4.3 Escalonamento Dinâmico de Recursos

Entre outras funções, cada eNodeB no sistema LTE é responsável pela administração do espectro, escalonando, entre os UE, os recursos tanto do *uplink* quanto do

Tabela 2 – Índices CQI definidos pelo 3GPP [1].

CQI	Modulação	Taxa de código	Eficiência
0	“Fora de área”	–	–
1	QPSK	0,076	0,1523
2	QPSK	0,12	0,2344
3	QPSK	0,19	0,377
4	QPSK	0,3	0,6016
5	QPSK	0,44	0,877
6	QPSK	0,59	1,1758
7	16QAM	0,37	1,4766
8	16QAM	0,48	1,9141
9	16QAM	0,6	2,4063
10	64QAM	0,45	2,7305
11	64QAM	0,55	3,3223
12	64QAM	0,65	3,9023
13	64QAM	0,75	4,5234
14	64QAM	0,85	5,1152
15	64QAM	0,93	5,5547

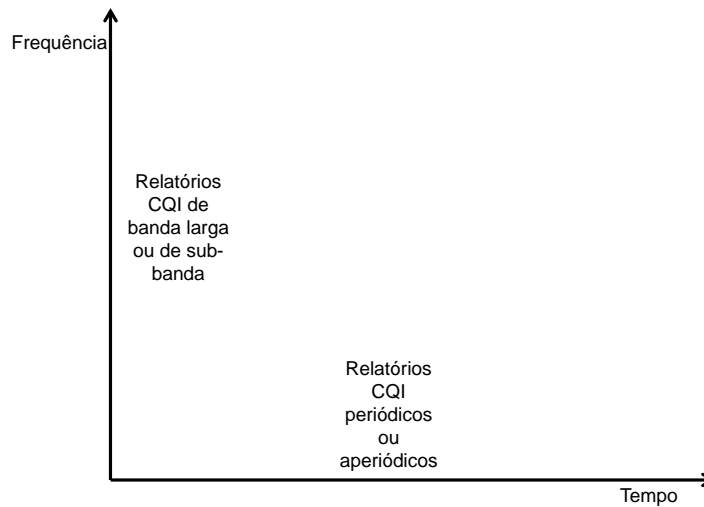


Figura 16 – Tipos de relatórios CQI informados pelo UE.

downlink. Para isso, o eNodeB necessita de um algoritmo de escalonamento de recursos para o usuário.

O objetivo de um algoritmo de alocação de recursos é a alocação dos RBs e de potências de transmissão em cada *subframe*, de forma que algumas medidas de desempenho máximas, médias e mínimas sejam otimizadas. Entre essas medidas estão o *throughput*, o *delay*, a eficiência espectral, entre outras [1].

Cada algoritmo de escalonamento que otimiza uma determinada capacidade do sistema é representado por uma função de prioridade; isto é, em um instante de tempo

especificado, a alocação de recursos deve satisfazer prioritariamente um determinado usuário, a partir de um algoritmo que estabelece um dado critério.

Funcionalmente, a entidade que estabelece quais RBs são destinados a quais usuários em cada intervalo de tempo é denominada escalonador (*scheduling*).

Usualmente, as técnicas dinâmicas de escalonamento utilizam a seguinte ideia: dado um número N_{MAX} que representa o número total de RBs físicos disponíveis, cada usuário k seleciona o(s) melhor(es) RB(s) disponível(eis) para sua necessidade dependendo da condição do canal. Dessa forma, é possível alocar recursos de acordo com o quanto cada usuário necessita, aumentando o *throughput* do sistema.

Um algoritmo que utiliza esta ideia é o *Round Robin*, que associa ciclicamente os recursos aos usuários, e é uma das formas mais simples de execução da alocação de recursos. Necessita de um baixo processamento, pois aloca igualmente os recursos entre os usuários. Dessa forma, todos os usuários possuem taxa de dados semelhantes, de forma que o *throughput* máximo não é alcançado.

Outra possibilidade é o *Proportional Fair Scheduling* [18]. Neste, a prioridade de associação de um RB para cada usuário é calculada, e após isso, a cada usuário com prioridade mais elevada é associado um RB. A prioridade do j -ésimo RB para o k -ésimo usuário no tempo n é calculado da seguinte forma:

$$P_{k,j}(n) = \frac{R'_{k,j}(n)}{R_k(n)} \quad (4.1)$$

onde $R'_{k,j}$ é a taxa de dados requerida para o k -ésimo usuário sobre o j -ésimo RB no tempo n , e R_k é a taxa média de dados do k -ésimo usuário.

Portanto, a alocação de recurso para um usuário em um determinado período é a razão entre a taxa instantânea requerida pela taxa média utilizada pelo usuário.

Adequando essa equação de prioridade para a dependência do sistema, pode-se incluir os fatores de ponderação α e β :

$$P_{k,j}(n) = \frac{(R'_{k,j}(n))^\alpha}{(R_k(n))^\beta} \quad (4.2)$$

A manipulação desses fatores permitem uma relação de compromisso entre a distribuição igualitária de taxa de dados e o *throughput* do sistema. Um peso maior no numerador aumenta o *throughput* do sistema, enquanto um peso maior no denominador incrementa a distribuição equalitária da taxa de dados.

5 Compartilhamento da Rede de Acesso de Rádio (RAN *Sharing*)

A evolução constante da tecnologia celular tem feito com que os fornecedores de serviço móvel necessitem desenvolver seus equipamentos e padrões à medida que novas técnicas surgem. Dessa forma, o compartilhamento de uma rede pode ser uma boa proposta, por atenuar a necessidade de incrementar o sistema, além de alta economia com relação à investimentos e manutenção e redução do *time-to-market*.

Há dois tipos de compartilhamento de arquitetura de rede disponíveis no LTE, de acordo com o 3GPP: um passivo, cuja característica é somente a divisão de espaço físico das células; e o ativo, no qual o compartilhamento se estende para a infraestrutura de transporte e espectro [8].

A Figura 17 ¹ contém duas arquiteturas principais de compartilhamento físico de rede, do tipo ativo, denominadas *Gateway Core Network* (GWCN), em que alguns elementos do EPC são divididos, e *Multi-Operator Core Network* (MOCN), no qual cada operadora mantém o próprio núcleo, mas compartilhando o acesso de rádio (RAN) [8].

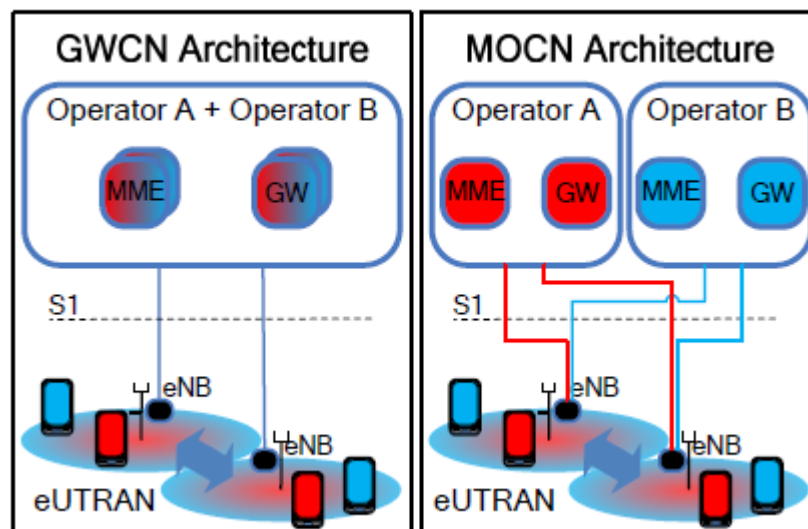


Figura 17 – Arquiteturas de compartilhamento de rede permitidas pelo 3GPP. Fonte: *NEC's Approach towards Active Radio Access Network Sharing* [8].

Nestes casos, o usuário não deve perceber os efeitos de compartilhamento; ou seja, o serviço oferecido ao usuário em uma configuração do tipo deve ser a melhor possível. Assim, métodos de gerenciamento de recursos devem ser analisados em uma situação do

¹ Imagem retirada de [8].

tipo, como a alocação dinâmica de recursos. A chave para o compartilhamento ativo é dividir os recursos para cada entidade de forma que cada uma receba a alocação estabelecida pelo acordo.

De acordo com [6], há alguns requisitos para prover a alocação de forma esperada:

- Isolamento: qualquer mudança em uma parte de cada operadora devido a mudanças nas condições de canal ou mobilidade do usuário não deve afetar a outra operadora;
- Alocação customizável: cada operadora pode utilizar a técnica de alocação de recursos entre os usuários da forma que desejar, se forma a manter sua política;
- Eficiência de recursos: a alocação entre as operadoras deve ser tal que os recursos não podem ficar inutilizáveis, o que significaria perdas econômicas.

Parte II

Metodologia de simulação

6 Desenvolvimento do simulador

A fim de investigar os efeitos do compartilhamento de recursos de rádio entre duas operadoras de telefonia móvel, e considerando que os simuladores disponíveis para o presente trabalho não são transparentemente adaptáveis para a pesquisa em questão, foi desenvolvido um simulador em ambiente MATLAB®, particularmente planejado para este estudo.

A estruturação do simulador levou em conta que o tema é fundamentado no problema de escalonamento de recursos de rádio, cuja versão dinâmica ocorre na camada MAC. Portanto, algumas simplificações são factíveis, em especial com relação à camada física, como será esclarecido mais adiante.

Unidades fundamentais do sistema foram elaboradas de acordo com os procedimentos previstos em [10], uma norma do 3GPP que dispõe sobre técnicas do acesso à recursos de rádio, abordando a camada física do LTE.

Com relação à geração de informação, três modelos estocásticos de tráfego foram concebidos de modo que a necessidade de pacotes de dados seja representada com maior fidelidade: tráfego de voz (VoIP), *streaming* de vídeo e navegação WEB (HTTP). O critério para escolha dos tipos de modelos foi baseado nos parâmetros QoS definidos na seção 4.2, de forma que a distribuição de prioridades para escalonamento seja interessante para o estudo.

A ideia básica da simulação é explorar os diversos arranjos possíveis de cenários onde uma operadora privilegia um determinado serviço, por exemplo a partir de planos ou promoções; como consequência, a quantidade média de usuários utilizando o serviço privilegiado é maior. Este fato, em conjunto com o escalonamento baseado na prioridade, pode resultar em dados interessantes e auxiliar a adaptação de provedoras de serviços à uma realidade de cooperação mútua, em vez de um quadro de competição.

No que concerne aos algoritmos de escalonamento de recursos para os usuários, foram enfatizadas estratégias que consideram a diferença nos serviços devido à necessidade de prioridade de alocação. Devido o fato de não haver um método padronizado com relação à algoritmos nas normas do 3GPP, as operadoras e fabricantes tem total liberdade para trabalhar com este problema, se os parâmetros QoS são satisfeitos. Há, portanto, diversos algoritmos disponíveis. Ainda que vários tenham sido estudados, apenas um dos numerosos algoritmos foi implementado, uma vez que a proposta do trabalho se baseia no estudo sobre o efeito do escalonamento entre as operadoras, e não entre os usuários. O escalonador elaborado constitui-se em dois escalonadores em série: um no domínio do tempo, que considera os parâmetros QoS, e um escalonador no domínio da frequência,

que além dessa função considera o estado do canal.

Este capítulo apresenta a modelagem do simulador e a descrição da funcionalidade de cada subsistema que o compõe, as simplificações necessárias e as justificativas para cada elemento do processo.

6.1 Simplificações

Considerando o problema proposto, é conveniente esclarecer previamente as unidades da tecnologia LTE que foram desconsideradas para o desenvolvimento do programa. Em primeiro lugar, o problema de escalonamento averiguado é inerente à camada MAC, e é uma das funcionalidades do Gerenciamento de Recursos de Rádio, tal como verificado no capítulo 4. Com relação às outras funções do RRM, no entanto, o escalonador é uma entidade de certa forma independente, no que se refere à autonomia de execução; isto é, recebe saídas de outras funcionalidades como entradas e envia informações, entretanto não é interrompida no andamento do processo. De fato, se algum processo necessita interromper o escalonamento em um instante t , este identificará a interrupção no instante $t + TTI$, após uma execução. À vista disso, o simulador foi organizado de tal forma que a camada física não tem uma implementação direta, mas as saídas que interessam ao problema (o relatório CQI e o *throughput*) foram geradas.

O *throughput* é deduzido facilmente a partir do tamanho do Bloco de Transporte, mas o relatório CQI necessita de uma configuração um pouco mais complexa. Dado que é um indicador da qualidade do canal, pode ser simulado por um processo estocástico; particularmente, um processo estocástico com estados discretos (CQI 1 a 15). Além disso, a probabilidade de transição entre os estados depende apenas do estado atual, sendo os estados anteriores irrelevantes (ou seja, a qualidade do canal no próximo período de relatório não é vinculada à qualidade percebida anteriormente, se a condição constatada no instante corrente é conhecida). Na teoria das probabilidades, esta circunstância é própria de uma cadeia de Markov, sendo portanto o meio para obtenção da informação do canal. Com relação ao tempo de *feedback*, foi escolhida a geração periódica. O tipo de relatório aperiódico, devido ao modo de produção de CQIs, não teria efeito diferente no simulador.

Outra simplificação que deve ser enunciada é a definição da direção de enlace; em virtude da complexidade de elaboração do sistema completo, foi selecionada a direção de *downlink*. O *uplink*, por ter o acesso à recursos diferente do *downlink*, tem um escalonamento e relatórios CQI ligeiramente distintos. Contudo, no modo realizado já é possível a obtenção de resultados satisfatórios, e portanto, a implementação do *uplink* é dispensável.

Sobre a tecnologia de transmissão espacial MIMO, sua implementação não foi realizada pelo fato de não ser necessária para a avaliação dos resultados esperados, ainda que seja uma possibilidade de estudo futuro.

Por fim, o sistema não considera o procedimento de retransmissão dado pelo HARQ, também em função da complexidade. Embora a requisição de retransmissão de pacotes tenha prioridade no escalonamento sobre outras requisições, a investigação deste efeito não faz parte do escopo do trabalho, e os resultados conservam-se válidos.

6.2 Modelagem do sistema

O Diagrama de blocos do simulador é apresentado na Figura 18. Seus componentes são detalhados a seguir:

- Configuração inicial do sistema – Estabelece as propriedades gerais do sistema, como:
 - Tempo de simulação;
 - Parâmetros do LTE com relação à estrutura dos frames e banda de transmissão;
 - Características do relatório de CQI, como o espaço de estados, distribuição inicial e probabilidades de transição de estados da cadeia de Markov, além dos atributos de tipo de transmissão (período, sub-bandas);
 - Mapeamento entre o CQI e o MCS, e deste com o TBS;
 - Geração dos pacotes de dados iniciais, determinados pelos modelos de tráfego;
 - Geração de usuários e operadoras, e suas associações aos modelos de serviço.
- Modelos de Tráfego – Produz as matrizes de requisição de pacotes de dados para cada um dos três modelos de tráfego escolhidos. Estas matrizes simulam os PDUs gerados na camada MAC, advindos do Bloco de Transporte correspondente.
- Escalonador – Dividido em dois sub-blocos, um para o prover o escalonamento de recursos de rádio entre as operadoras e outro para os usuários. A alocação de RBs para os usuários é dividida ainda em mais dois elementos, o escalonamento no tempo e outro na frequência.
- *Link Adaptation* – Ou Adaptação do Enlace, gera os valores de CQI em sub-bandas para cada usuário no período determinado, assim como os valores de CQI de banda larga, utilizando o sistema constituído pela cadeia de Markov. Ademais, faz o mapeamento destes ao MCS.
- *Transport Block Size* (TBS) – Adquire o tamanho do Bloco de Transporte da camada MAC a partir do número de RBs alocados e do valor do MCS.
- LTE PHY – Elemento não implementado diretamente; se refere às informações que seriam obtidas na camada física, como os relatórios de CQI e o valor do *throughput* a partir do TBS provindo da camada MAC.

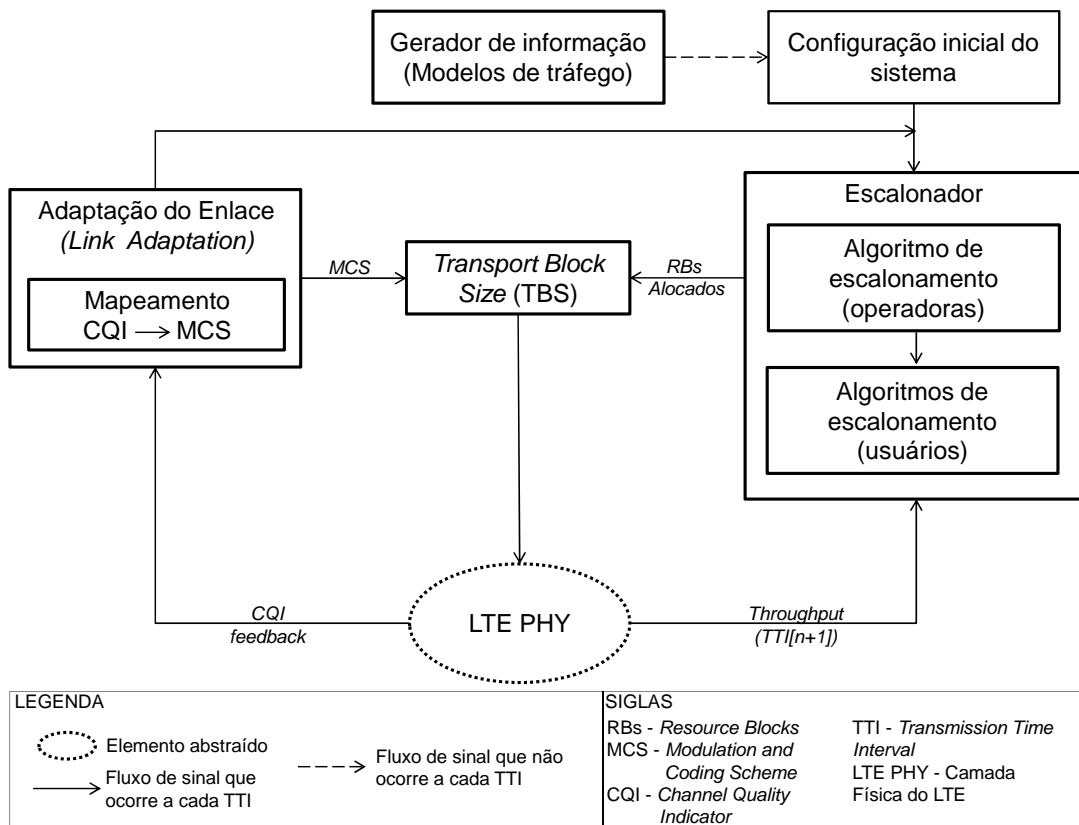


Figura 18 – Diagrama de blocos básico do sistema implementado em software apresentando seus elementos principais.

Inicialmente, as configurações iniciais são estabelecidas, assim como os pacotes de dados dos serviços utilizados pelos usuários gerados, em sua maioria suficientes para a simulação. Todavia, se durante a execução do programa um usuário recebe todos os dados requisitados, devido à quantidade de pacotes gerada estocasticamente ser baixa, então *i*) o bloco de gerador de informações é novamente requisitado, ou *ii*) o usuário conclui sua conexão.

Após a definição dos parâmetros iniciais, as outras funções realizam uma execução por TTI, seguindo a sequência: os relatórios CQIs são gerados e mapeados ao MCS; o escalonador aloca os recursos disponíveis às operadoras e usuários utilizando o MCS, os parâmetros QoS definidos na configuração inicial e os valores de *throughput* anterior de cada usuário (condição inicial = 0); o TBS é gerado como consequência ao MCS e a alocação de RBs; e finalmente, o *throughput* é inferido do TBS.

Com relação à Administração dos Recursos de Rádio, na Figura 19 são destacadas as funções implementadas de alguma forma¹, e detalhadas a seguir:

- Gerenciamento QoS – referente aos parâmetros QoS atribuídos aos serviços, que influenciam no escalonamento de recursos;

¹ Imagem adaptada de [4].

- Controle de Admissão – no simulador, executa uma funcionalidade simples de transição entre dois estado do usuário: *RRC_IDLE* e *RRC_CONNECTED*, onde a transição do primeiro estado para o segundo é controlada de acordo com a capacidade de recursos do sistema.
- Escalonamento dinâmico – realiza decisões sobre alocação de recursos a cada TTI, implementada pelo bloco do escalonador.
- Adaptação do enlace e Gerenciamento do relatório CQI – efetua as funções do bloco de Adaptação do Enlace e da abstração da camada física mencionadas anteriormente.

No plano do escalonamento entre as operadoras, a simulação realiza uma alocação estática de recursos, com o intuito de adquirir informações sobre o efeito deste tipo de compartilhamento. É importante notar que isso difere do escalonamento persistente, que não foi implementado no simulador, e cuja função é alocar os recursos estaticamente de forma periódica considerando o tipo de serviço do usuário.

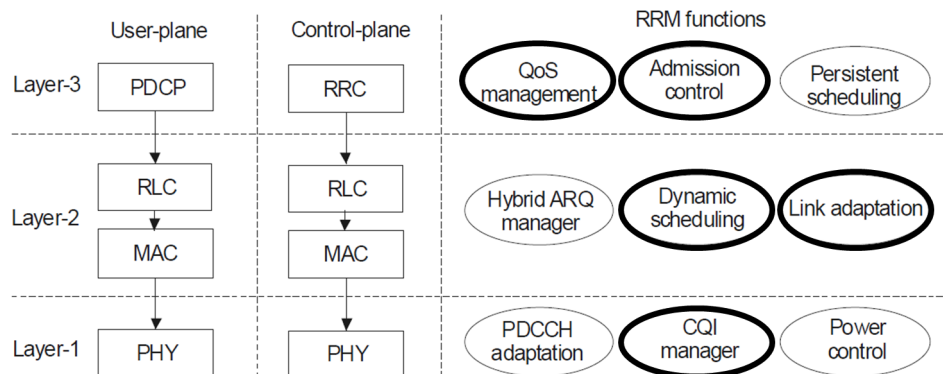


Figura 19 – Indicação (em destaque) das funções de Administração de Recursos de Rádio implementadas no simulador. Fonte: *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access* [4].

6.3 Geração de relatórios CQI

Conforme apresentado na seção 4.2, a partir da informação de estado de canal CQI, seleciona-se o nível de modulação e a taxa de codificação de canal que podem ser utilizados pelo transmissor como referência de melhor desempenho para o enlace.

Assim como pronunciado anteriormente, o simulador simplifica a camada física, e portanto, a SINR também é abstraída. Dessa forma, a informação de CQI que seria escolhida no UE a partir da SINR é representada por uma cadeia de Markov.

Preliminarmente, pressupondo o canal com qualidade razoavelmente boa, a probabilidade do enlace ter uma modulação 64QAM é maior que as outras, seguida pela

modulação 16QAM e, por fim, QPSK. De acordo com esse raciocínio, forma-se uma cadeia de Markov de nível superior aos 15 estados de CQI, como é mostrado na Figura 20, representando a transição entre as três formas de modulação.

Seja t_{ij} a probabilidade de mudança do estado j para o estado i em uma geração de CQI; a matriz de transição equivalente à esta cadeia de Markov é

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

e a distribuição inicial entre os três estados pode ser descrita pelo seguinte vetor de estados:

$$P_0 = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Dado o problema em questão, a distribuição em uma determinada geração deve ser 1 no estado atual e 0 nos outros estados. A matriz de transição de alto nível e o vetor de estados, de acordo com o determinado para a qualidade do canal, foram estabelecidos como:

$$T_{HL} = \begin{bmatrix} \frac{29}{32} & \frac{1}{32} & \frac{1}{64} \\ \frac{1}{32} & \frac{29}{32} & \frac{2}{32} \\ \frac{1}{16} & \frac{1}{16} & \frac{61}{64} \end{bmatrix}, \quad P_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Segundo [19], a distribuição de estados após k gerações é dada por

$$P_k = T^k P_0. \quad (6.4)$$

A divisão de probabilidades é tal que, após um período k suficientemente grande, as probabilidades de encontrar-se em cada um dos estados é:

$$P_k = T_{HL}^k P_0 = \begin{bmatrix} 5/28 \\ 1/4 \\ 4/7 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 17.86\% \\ 25.00\% \\ 57.14\% \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Dado que, na realidade, existem 15 estados representados por cada valor CQI, a matriz de transição deve ter dimensão 15×15 . Para a elaboração dessa matriz foram consideradas inicialmente, as transições entre os estados de baixo nível de um mesmo

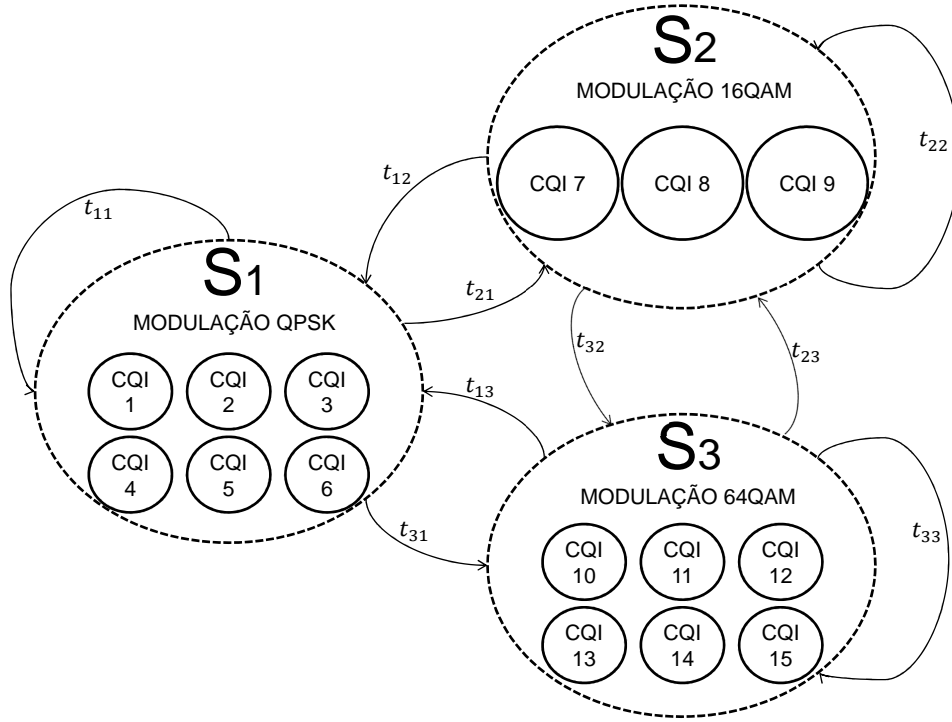


Figura 20 – Diagrama de estados da cadeia de Markov de nível superior representando as transições entre as três modulações.

estado de alto nível, cujas matrizes são definidas a seguir:

$$T_{QPSK_{6 \times 6}} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ 1 & \dots & 1 \\ 3 & \dots & 3 \\ 3 & \dots & 3 \\ 4 & \dots & 4 \\ 4 & \dots & 4 \end{bmatrix}, T_{16QAM_{3 \times 3}} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}, T_{64QAM_{6 \times 6}} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Observando as transições, nota-se que os estados com modulação 64QAM foram propostos com igual probabilidade de ocorrência, assim como os estados de modulação 16QAM, e diferentemente da modulação QPSK. Desse modo, a alegação que o canal esteja “razoavelmente bom” indica a maior possibilidade do usuário requisitar uma modulação 64QAM ou 16QAM.

Seja $M_{Am \times n}$ uma matriz de dimensão $m \times n$ com todos elementos iguais a $\frac{1}{3}$ e $M_{Bm \times n}$ uma matriz de dimensão $m \times n$ com todos elementos iguais a $\frac{1}{6}$. Então a matriz

de transição de estados para o problema em questão foi definida como:

$$T_{15 \times 15} = \begin{bmatrix} T_{HL(1,1)} T_{QPSK} & T_{HL(1,2)} M_{B3 \times 6} & T_{HL(1,3)} M_{B6 \times 6} \\ T_{HL(2,1)} M_{A6 \times 3} & T_{HL(2,2)} T_{16QAM} & T_{HL(2,3)} M_{A6 \times 3} \\ T_{HL(3,1)} M_{B6 \times 6} & T_{HL(3,2)} M_{B3 \times 6} & T_{HL(3,3)} T_{64QAM} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Por consequência, os estados de baixo nível de uma mesma modulação tem igual probabilidade de transitar aos outros estados. Assim, na maior parte do tempo de simulação, o UE sugere ao eNodeB uma modulação 64QAM, e na menor parte do tempo, a modulação QPSK.

6.4 Procedimentos do UE para relatórios de Informação do Estado do Canal (CSI)

Conforme afirmado na seção 4.3, os relatórios CQI podem ser periódicos ou aperiódicos, com relação ao tempo, e de banda larga ou de sub-banda, com relação à frequência. No simulador, foi desenvolvido somente o retorno de CQI periódico no domínio do tempo. De acordo com [1], para o relatório CQI periódico do tipo *UE selected sub-band*, o número total de sub-bandas N é dividido em J frações chamadas partes da largura de banda. O valor de J depende da largura de banda do sistema, e é definido na seção 7.2 da norma do 3GPP [10], reproduzido na Tabela 3.

Tabela 3 – Relatório CQI periódico do tipo *UE selected sub-band*: Tamanho das sub-bandas (k) e partes da largura de banda (J) para cada largura de banda do *downlink*[10].

Largura de Banda do Sistema (RBs)	Tamanho da sub-banda (k RBs)	Número de partes da largura de banda (J)
6-7	(Somente CQI de banda larga)	1
8-10	4	1
11-26	4	2
27-63	6	3
64-110	8	4

Neste caso, um valor CQI é associado a uma sub-banda selecionada de cada parte da largura de banda, e portanto, o eNodeB recebe J valores de CQI e os índices da sub-banda correspondente.

De acordo com [11], se a largura de banda do *downlink* é N_{RB}^{DL} (em número de RBs) dividida em N sub-bandas, então $\lfloor N_{RB}^{DL}/k \rfloor$ sub-bandas tem tamanho k e a última sub-banda tem tamanho $N_{RB}^{DL} - k \lfloor N_{RB}^{DL}/k \rfloor$ (sendo $\lfloor \cdot \rfloor$ a simbologia de aproximação ao

número inteiro mais próximo na direção de $-\infty$). Uma parte da largura de banda, por outro lado, constitui-se N_j consecutivas sub-bandas; se $J = 1$, então $\lceil N_{RB}^{DL}/k \rceil$; se $J > 1$, então $\lceil N_{RB}^{DL}/k/J \rceil$ ou $\lceil N_{RB}^{DL}/k/J \rceil - 1$, dependendo dos valores de J , k e N_{RB}^{DL} (sendo $\lceil \cdot \rceil$ a simbologia de aproximação ao número inteiro mais próximo na direção de $+\infty$).

Na Figura 21 está representada a seleção CQI do tipo *UE selected sub-band*, onde o usuário informa ao eNodeB um CQI para uma sub-banda selecionada de cada parte da largura de banda².

No simulador, o usuário associa um CQI a cada sub-banda, e seleciona os melhores valores e as respectivas sub-bandas para relatório ao eNodeB. O CQI de banda larga, por outro lado, é a média dos CQIs de todas as sub-bandas.

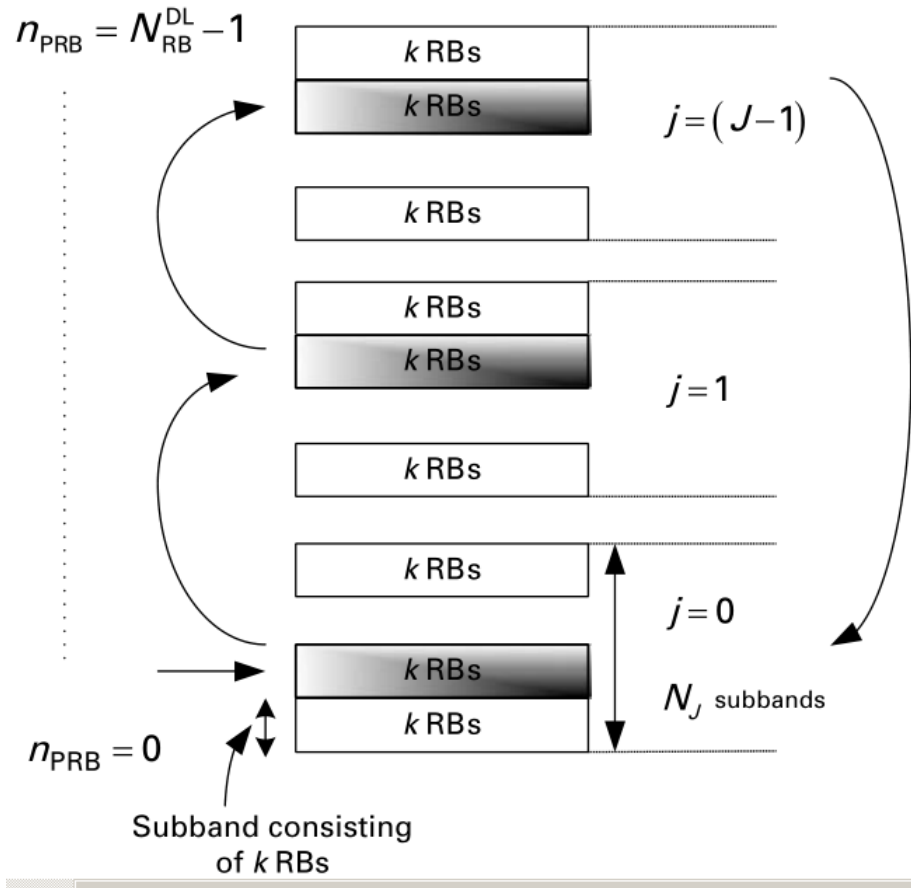


Figura 21 – Representação da seleção de CQI em uma sub-banda de cada parte da largura de banda, de acordo com o padrão do 3GPP. Fonte: *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance* [3].

O período de relatórios é dado por [1]:

$$\{2, 5, 10, 16, 20, 32, 40, 64, 80, 128, 160\} \text{ ms}$$

² Imagem retirada de [3].

Seja N_p o período para o relatório de sub-bandas, estabelecido como um dos períodos acima. Então o período de relatório CQI de banda larga é HN_p , onde $H = JK + 1$, sendo K um valor selecionado do conjunto $\{1, 2, 3, 4\}$ [11]. Cabe ao eNodeB eleger o melhor período de relatórios ao escalonador.

6.5 Procedimentos do UE para recepção do PDSCH

6.5.1 Tipo de alocação de recursos

O DCI (*Downlink Control Indicator*) é a informação de controle com a qual o eNodeB informa o UE os índices dos RBs que este está associado, após o escalonamento. Entretanto, se o número de RBs alocados é muito alto, a mensagem de DCI é excessiva para um sinal de controle; assim, a especificação técnica do 3GPP [10] especifica a forma com que o escalonador aloca RBs para cada transmissão, de modo a prover maior flexibilidade.

Para reduzir o tamanho do DCI, o 3GPP introduz três diferentes tipos de estratégias de alocação, que utilizam procedimentos predefinidos: Tipo 0, Tipo 1 e Tipo 2. Para o simulador proposto, foi implementada a alocação de recursos Tipo 0, uma forma mais simples e mais utilizada³.

Na alocação de recursos Tipo 0, a informação de RBs atribuídos inclui um mapeamento de bits indicando os RBGs (*Resource Blocks Groups*) que são alocados para o UE. Um RBG é um conjunto de RBs consecutivos, de tamanho P , que é função da largura de banda do sistema, cuja relação é informada na Tabela 4.

Ainda segundo [10], o número total de RBGs (N_{RBG}) para a largura de banda N_{RB}^{DL} do *downlink* é $\lceil N_{RB}^{DL}/P \rceil$, onde $\lceil N_{RB}^{DL}/P \rceil$ dos RBGs tem tamanho P e o último tem tamanho $N_{RB}^{DL} - P \lfloor N_{RB}^{DL}/P \rfloor$, se $N_{RB}^{DL} \bmod P > 0$.

Na Figura 22, ilustra-se esse modo de alocação de recursos. No exemplo, o eNodeB envia a atribuição de RBG ao usuário representada pelos bits mostrados, onde 1 equivale à associação do RBG; dessa forma, o UE é informado da quantidade e dos índices do RBG associado. O tamanho dos 12 primeiros RBGs é 2 RBs e do último RBG é $N_{RB}^{DL} - P \lfloor N_{RB}^{DL}/P \rfloor = 1$, para $N_{RB}^{DL} = 25$ RBs, correspondente à largura de banda de 5 MHz. Dessa forma, a quantidade de bits enviados no DCI é 13, e não 25, como seria no caso de uma atribuição para cada RB.

Nota-se que a relação entre o tamanho do RBG e a largura de banda, na Tabela 4, auxilia o mapeamento ao CQI informado pelo usuário – cada sub-banda tem tamanho exatamente duas vezes maior que um RBG.

³ Vide a especificação técnica [10], seção 7.1.6, para os outros tipos de alocação de recursos.

Tabela 4 – Relação entre o tamanho do RBG e a largura de banda do *downlink*, para a alocação de recursos Tipo 0 [10].

Largura de Banda do Sistema N_{RB}^{DL}	Tamanho do RBG (P)
≤ 10	1
11-26	2
27-63	3
64-110	4

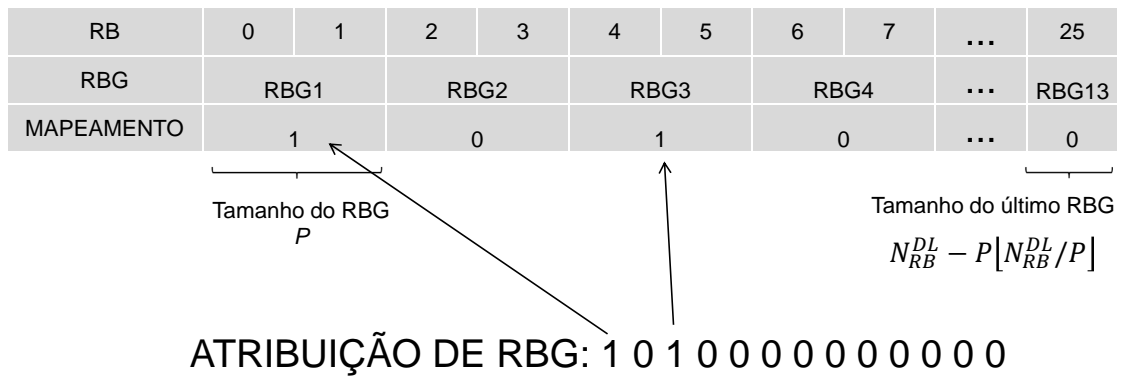


Figura 22 – Exemplo para alocação de recursos Tipo 0, com uma largura de banda de 5 MHz (25 RBs).

6.5.2 Modulação e determinação do tamanho do Bloco de Transporte

Dado que o TBS não é fixo, a norma [10] também estabelece a determinação da quantidade de bits que são transferidas em um Bloco de Transporte, por TTI.

Inicialmente, o eNodeB deve atribuir um índice MCS ao usuário, podendo seguir o valor CQI informado. No simulador implementado, o mapeamento é mostrado na Tabela 5, que também informa a ordem de modulação (QPSK = 2, 16QAM = 4, 64QAM = 6) e o índice TBS (I_{TBS}) associado⁴.

De posse do I_{TBS} e da quantidade de RBs associados, a Tabela 7.1.7.2.1-1 de [10] informa o tamanho do Bloco de Transporte em bits. Como exemplo, se foram alocados todos os recursos para um usuário (100 RBs) cujo $I_{TBS} = 26$, então o TBS tem tamanho 75376 bits, a maior quantidade de bits alcançada. Segundo a referência [20], o cálculo do *throughput* no simulador é imediato:

$$\text{throughput} = \frac{TBS}{TTI} = \frac{75376 \text{ bits}}{1 \text{ ms}} = 75,376 \text{ Mbps}$$

⁴ Tabela adaptada de [10].

Tabela 5 – Mapeamento entre o CQI, MCS, Modulação e índice TBS[10]. O mapeamento entre os índices MCS não utilizados foi suprimido.

Índice CQI I_{CQI}	Índice MCS I_{MCS}	Ordem da Modulação Q_m	Índice TBS I_{TBS}
1	0	2	0
2	2	2	2
3	4	2	4
4	6	2	6
5	8	2	8
6	10	2	9
7	12	4	11
8	14	4	13
9	16	4	15
10	18	6	16
11	20	6	18
12	22	6	20
13	24	6	22
14	26	6	24
15	28	6	26

6.6 Modelos de Tráfego

Conforme enunciado anteriormente, os modelos de tráfego escolhidos para implementação foram para serviços de VoIP, *streaming* de vídeo e *Web browsing* HTTP (*hypertext transfer protocol*). Este conjunto de modelos considera categorias diferentes de tráfego, com o objetivo de reforçar a fidelidade dos resultados. Os modelos de VoIP e vídeo foram extraídos de [3] e o modelo de navegação web foi adaptado de [21] e [3].

6.6.1 Modelo de tráfego de VoIP

O modelo é tal que também pode ser representado por uma cadeia de Markov, de forma simplificada. Na Figura 23 é mostrado um diagrama de estados representando a atividade de voz, ou seja, as probabilidades de haver períodos de silêncio (estado 0 – inativo) ou períodos de conversa (estado 1 – ativo)⁵. A probabilidade de transição do estado 0 ao estado 1 é α e a probabilidade de transição do estado 1 ao estado 0 é β . A matriz de transição é, então,

$$T_{VOIP} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha & \beta \\ \alpha & 1 - \beta \end{bmatrix}. \quad (6.8)$$

⁵ A Figura foi retirada de [3].

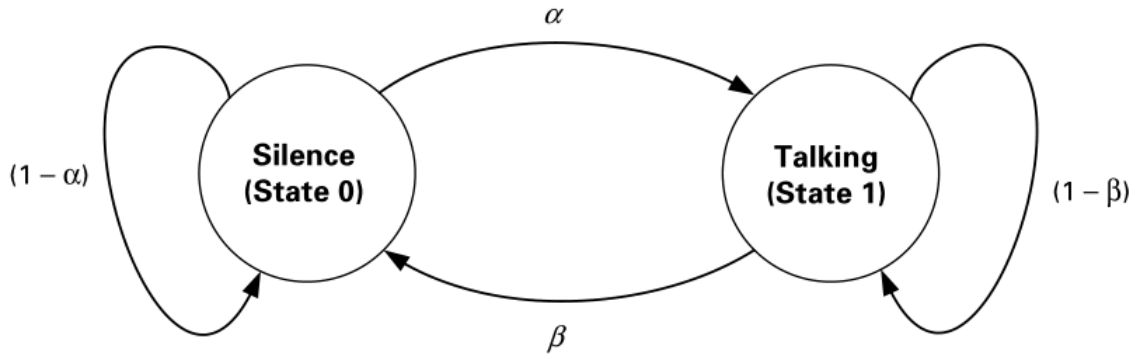


Figura 23 – Representação do diagrama de estados do modelo de atividade de voz. Fonte: *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance* [3].

As probabilidades de se encontrar no estado 0 e no estado 1 são dadas por:

$$P(\text{Estado 0}) = \frac{\beta}{\alpha + \beta}, P(\text{Estado 1}) = VAF = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}, \quad (6.9)$$

onde VAF é o Fator de Atividade de Voz.

A cada $t_{\text{encoder}} = 20$ ms, dada pelo codificador, ocorre uma transição de estados (para outro estado ou para o mesmo). A Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados para o modelo.

Sendo a taxa da fonte de 12,2 Kb/s, o frame de voz gerado a cada 20 ms tem 244 bits. Incluindo o tamanho total em bits adicionados por cabeçalhos de protocolos, segurança, CRC (*Cyclic Redundancy Check*), entre outros, o tamanho total de um pacote enviado por interface de rádio é 40 bytes. Portanto, no estado 1, são enviados 40 bytes a cada 20 ms.

No estado 0, um *Silence Insertion Descriptor* (SID) (um método de compressão utilizado em codificadores para favorecer-se de redundâncias) é utilizado para enviar um pacote de 15 bytes, transmitidos a cada 8 frames (160 ms).

No simulador, o modelo retorna uma matriz cujas colunas são bits e tempo (*delay*), de acordo com o apresentado na Figura 24. No exemplo, o sistema está inicialmente no estado 0, e envia pacotes de 15 bytes (120 bits) a cada 8 frames. Quando ocorre transição de estado, a transmissão para a ter pacotes de 40 bytes (320 bits) a cada frame.

6.6.2 Modelo de tráfego de navegação web HTTP

Uma sessão de navegação web é dividida em períodos de *ON/OFF*, que representam os *downloads* da página e os tempos intermediários, conforme mostrado na Figura 25. Esses tempos resultam tanto do modelo HTML quanto da interação humana. Uma chamada de pacotes consiste em um objeto principal, que é a página HTML inicial, e

Tabela 6 – Parâmetros do modelo de tráfego VoIP [3].

Parâmetro/ Componente	Valor
Codec de voz	RTP AMR 12.2, Taxa da fonte: 12,2 Kb/s
Tamanho do frame	20 ms
<i>Voice activity factor</i> (VAF)	50% ; $\alpha = \beta = 0,01$
<i>Silence Insertion Descriptor</i> (SID)	15 bytes a cada 160 ms
Tamanho do pacote de voz	40 bytes

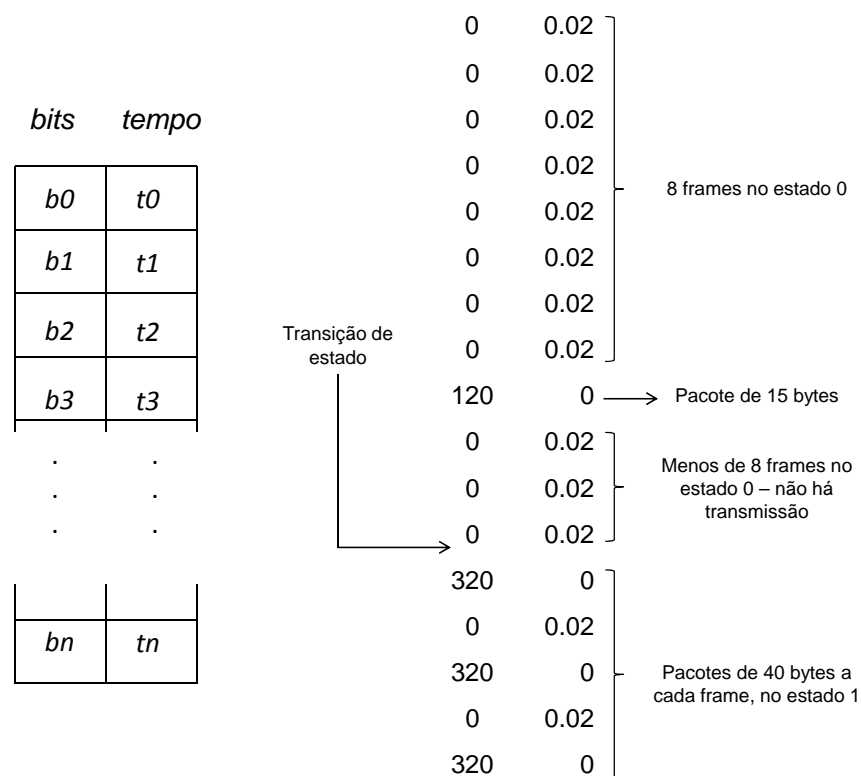


Figura 24 – Matriz de retorno do modelo no simulador para o tráfego de voz.

vários objetos incorporados, simulando possíveis imagens, *banners*, ou outro conjunto de dados que não faz parte da página principal. Entre uma chamada de pacotes e outra, há o tempo de leitura, que depende do usuário. Na Tabela 7 são mostrados os parâmetros do modelo com suas respectivas distribuições estocásticas.

Para o simulador foi implementado o modelo HTTP/1.0, que está presente em 50% das conexões HTTP. Além disso, o *download* dos objetos principais e incorporados são realizados com um modelo de conexão TCP⁶.

⁶ Em virtude de sua extensão e do fato de não ser objetivo deste trabalho, os passos para o modelo não foram apresentados. Vide referência [21] para o algoritmo completo do modelo de TCP.

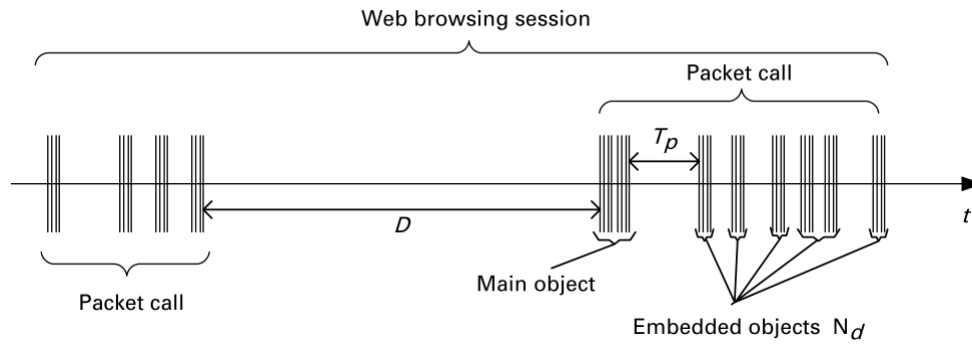


Figura 25 – Comportamento dos pacotes de dados em uma sessão de navegação web.
Fonte: *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance* [3].

Tabela 7 – Parâmetros do modelo de navegação web [3][21].

Componente	Distribuição	Parâmetros
Tamanho do objeto principal (S_M)	LogNormal Truncada	Média = 10710 bytes D.P. = 25032 bytes Mínimo = 100 bytes Máximo = 2 Mbytes
Tamanho do objeto incorporado (S_E)	LogNormal Truncada	Média = 7758 bytes D.P. = 126168 bytes Mínimo = 50 bytes Máximo = 2 Mbytes
Número de objetos incorporados por página (N_d)	Pareto Truncada	Média = 4,23 Máximo = 53
Tempo de Leitura (D_{PC})	Exponencial	Média = 30 s
Tempo de análise (T_P)	Exponencial	Média = 0.13 s

6.6.3 Modelo de tráfego de *streaming* de vídeo

Na Tabela 8, são apresentados os parâmetros para o modelo de vídeo. A taxa da fonte de vídeo é estabelecida em 64 Kb/s, e cada frame de vídeo é enviado em um intervalo regular determinado pelo número de frames por segundo (10 frames/s no modelo). Cada frame é dividido em 8 partes, chamadas pacotes de frame; o tamanho de cada pacote é estocástico cuja distribuição e parâmetros são mostrados na Tabela 8, assim como os *delays* entre cada pacote e cada frame.

6.7 Etapas e algoritmos de escalonamento

O tipo de escalonador utilizado na simulação é denominado um escalonador de dois estágios, um no domínio do tempo (*Time Domain Scheduler*) e outro no domínio da frequência (*Frequency Domain Scheduler*). Ambos podem utilizar as características

Tabela 8 – Parâmetros do modelo de tráfego de *streaming* de vídeo [3].

Parâmetro/ Componente	Caracterização Estatística
Tempo de chegada entre o início de cada frame	Determinístico: 100 ms
Número de pacotes em um frame	Determinístico: 8 pacotes por frame
Tamanho do pacote	Distribuição de Pareto Truncada Média = 10 bytes Máximo = 250 bytes
Tempo de chegada entre os pacotes de um frame	Distribuição de Pareto Truncada Média = 6 ms Máximo = 12,5 ms

do tipo de serviço, em função dos parâmetros QoS, e a diversidade de frequência de múltiplos usuários, em função do Indicador de Qualidade de Canal CQI. O algoritmo de escalonamento nos domínios da frequência e do tempo foi combinado das referências [4], [22], [23], [24] e [25].

A Figura 26 descreve a estrutura do escalonamento de recursos utilizado no simulador. Seja N_{UE} o número total de usuários conectados ao eNodeB. O sistema averigua a escalonabilidade de cada usuário $k = \{0, 1, \dots, N_{UE}\}$ a partir da requisição de pacotes de dados, aqui denominada *buffer*. então lista de usuários que tem pacotes no *buffer*, de tamanho N_{UEsch} , é desagregada em duas listas de tamanho N_{UEGBR} e N_{UENGBR} , formadas a partir da classificação do tipo de serviço do usuário: GBR (*guaranteed bit rate*) e NGBR (*non-guaranteed bit rate*), que no caso, representa os usuários de VoIP e vídeo para a lista GBR e navegação web para a lista NGBR.

No escalonador no domínio do tempo, as duas listas são tratadas separadamente. Seja $R_k[n]$ o *throughput* estimado na Adaptação do Enlace (com o CQI de banda larga), ou seja, a taxa máxima alcançável para o usuário k no instante de tempo n ; e $T_k[n]$ o *throughput* médio no passado. Então, o princípio do escalonador é selecionar o usuário k' no instante de tempo n que maximiza [23][22]:

$$k' = \arg \max_k \{M_k[n]\} = \arg \max_k \left\{ \frac{(R_k[n])^\alpha}{(T_k[n])^\beta} w_k \right\}, \quad (6.10)$$

onde $M_k[n]$ é a métrica para o usuário k no n -ésimo *subframe*, α e β são os parâmetros de ajuste que ponderam a métrica segundo o compromisso desejado (*throughput* do sistema ou

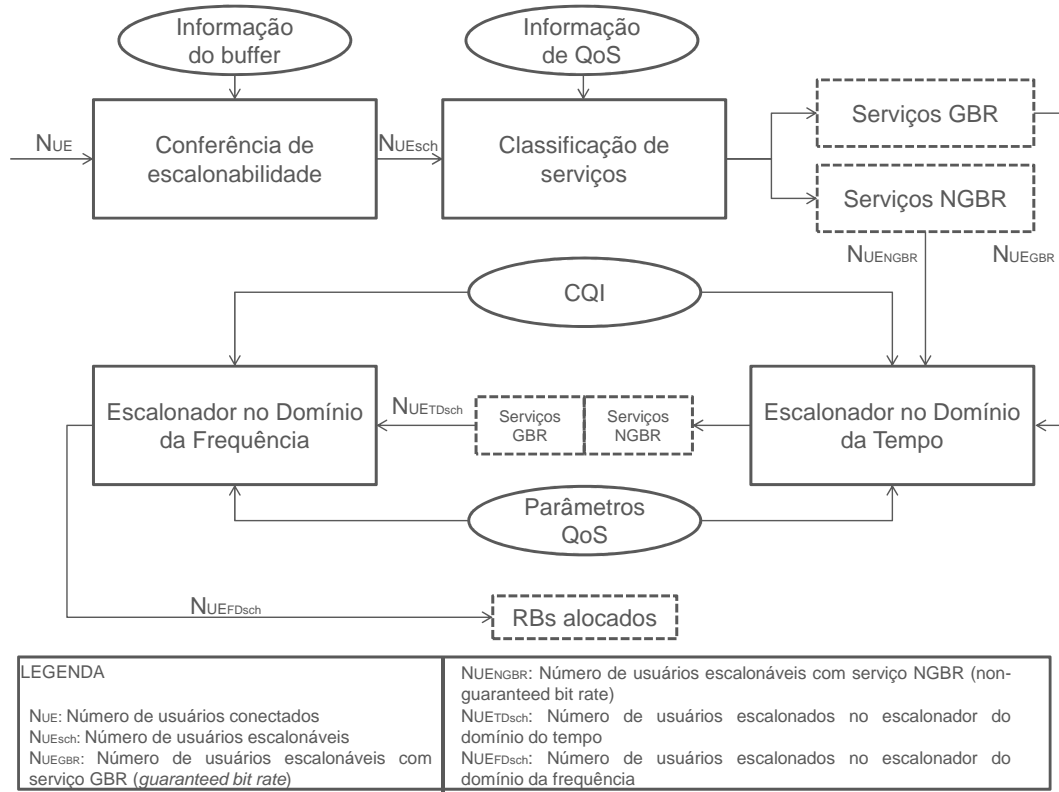


Figura 26 – Etapas do escalonamento de recursos implementado no simulador, considerando os parâmetros QoS e a qualidade do canal.

distribuição igualitária de recursos). O peso w_k é o fator de escala baseado nos parâmetros QoS [25][24]. O throughput médio no passado é calculado recursivamente como[23][24]:

$$T_k[n] = \left(1 - \frac{1}{N_k}\right) T_k[n-1] + \frac{r_k[n]}{N_k}, \quad (6.11)$$

sendo $r_k[n]$ o *throughput* acumulado para o usuário k no n -ésimo TTI e N_k a memória do filtro. Modificar a memória do filtro significa aumentar ou diminuir a janela que compreende os dados para o usuário no passado. No simulador, N_k é o mesmo para todos os usuários.

Para os usuários GBR, o escalonamento é do tipo *round robin*, com $\alpha = 0$ e $\beta = 1$. O escalonamento para a lista de usuários NGBR, ao contrário, utiliza a métrica do algoritmo *proportional fair*, com ambos parâmetros unitários[22].

A lista de usuários por ordem de prioridade na saída do escalonador no domínio do tempo é dada pela concatenação das listas GBR e NGBR; os usuários GBR tem prioridade absoluta sobre os outros, no domínio do tempo. O número de usuários na lista fornecida ao escalonador no domínio da frequência é $N_{UE_{TDsch}}$, que equivale à parte superior da lista anterior que comporta o máximo de usuários que podem ser escalonados no domínio

da frequência, isto é, menor ou igual ao número de RBGs.

No escalonador no domínio da frequência, deve-se alocar os RBs aos usuários; assim, seleciona-se o usuário k' no instante de tempo n que maximiza a métrica ao RB b [4][22]:

$$k' = \arg \max_k \{M_k[b, n]\} = \arg \max_k \left\{ \frac{(R_k[b, n])^\alpha}{(T_{sch,k}[n])^\beta} \right\}, \quad (6.12)$$

onde $R_k[b, n]$ é o *throughput* estimado na Adaptação do Enlace para o RB b (utilizando o CQI de sub-banda). O fator $T_{sch,k}[n]$ é *throughput* médio no passado somente onde o usuário k foi escalonado:

$$T_{sch,k}[n] = \left(1 - \frac{\lambda_k}{N_s}\right) T_{sch,k}[n-1] + \frac{r_k[n]}{N_s} \lambda_k, \quad (6.13)$$

O fator N_s é a memória do filtro no escalonador no domínio da frequência e λ_k é 1 se o usuário foi escalonado no TTI anterior ou 0, se o contrário. Se $\alpha = 1$ e $\beta = 1$, este escalonador denomina-se *Frequency Domain – Proportional Fair scheduled (FDPFsch)*.

Na saída do bloco, há $N_{UEFDsch}$ usuários associados a um ou mais RBs, dependendo do tamanho do RBG e da alocação de recursos. A Tabela 9 resume as métricas utilizadas para escalonamento.

Tabela 9 – Métricas utilizadas no escalonador no domínio do tempo e da frequência.

Métrica de escalonamento no domínio do tempo M_{TD}	Métrica de escalonamento no domínio da frequência M_{FD}
$M_{TD} = \frac{(R_k[n])^\alpha}{(T_k[n])^\beta}$	$M_{FD} = \frac{(R_k[b,n])^\alpha}{(T_{sch,k}[n])^\beta}$
GBR: <i>Round Robin</i> ($\alpha = 0, \beta = 1$)	<i>Proportional Fair Scheduled</i> ($\alpha = 1, \beta = 1$)
NGBR: <i>Proportional Fair</i> ($\alpha = 1, \beta = 1$)	
Legenda	
$R_k[n]$ = <i>throughput</i> estimado do usuário k com o CQI de banda larga	
$T_k[n]$ = <i>throughput</i> médio no passado do usuário k	
$R_k[b, n]$ = <i>throughput</i> estimado do usuário k para o RB b com o CQI de sub-banda	
$T_{sch,k}[n]$ = <i>throughput</i> médio no passado onde o usuário k foi escalonado	

Parte III

Resultados e Conclusões

7 Resultados e discussões

7.1 Parâmetros e premissas de simulação

O cenário de simulação é constituído de uma célula, e um número máximo de usuários fixo, de forma que não haja consumo total dos recursos, e seja possível analisar a eficiência no caso em que as operadoras não utilizam toda a largura de banda.

Os usuários utilizam um serviço conforme os modelos mostrados no capítulo 6. Se um UE completa uma chamada, este é desconectado ($RRC_CONNECTED \rightarrow RRC_IDLE$). Então, um novo usuário é admitido e o tipo de serviço é selecionado aleatoriamente conforme a distribuição estatística. Na Tabela 10 é apresentada essa distribuição, adaptada de [3]. De forma a simplificar o processo de escalonamento, pressupõe-se que cada usuário é associado a apenas um tipo de tráfego.

Os parâmetros gerais de simulação são mostrados na Tabela 11. O tipo de escalonamento entre as operadoras é uma alocação estática, onde cada uma tem um dado percentual de recursos. A proposta da simulação é variar esse percentual para comparar a eficiência da operadora que investe em um serviço com baixo tráfego de dados, em conjunto com o *throughput*.

Espera-se, com os resultados, aferir o produto da simulação nos seguintes casos:

- (i) Variar a proporção de serviços entre as duas operadoras, assim como o percentual de recursos alocados para cada uma.
- (ii) Elevar o número de usuários conectados e comparar a eficiência nos casos próximos aos extremos de proporção de serviços.

Na Tabela 12 são indicados os diferentes cenários simulados, para quadro de simulação (i). A ideia da combinação de cenários é explorar ao máximo os recursos do simulador com relação ao evento em que uma operadora investe em um serviço GBR em detrimento de um NGBR, e vice-versa; portanto, a finalidade é comparar o efeito de uma operadora contendo mais usuários utilizando VoIP ou vídeo com outra utilizando navegação web. O quadro de simulação (ii) utilizará os cenários 2 e 5, para o caso I, de forma que seja possível observar o efeito da parcela de 20% de usuários utilizando web *browsing* na Operadora A.

Tabela 10 – Percentual de usuários em cada tipo de serviço simulado.

Serviço	QCI	Categoria de tráfego	Percentual de usuários
VoIP	1	Tempo real	40%
<i>Streaming</i> de vídeo	4	<i>Streaming</i>	30%
<i>Web browsing</i> HTTP	9	Interativo	30%

Tabela 11 – Parâmetros e hipóteses de simulação do sistema.

Parâmetro	Configuração
Período de simulação	10 s
Tipo de sistema	<i>Single Cell</i>
Número de UEs	50 – 80
Largura de Banda do Sistema	10 MHz
Número de RBs	50
Duplexação	FDD
Modulações	QPSK, 16QAM, 64QAM
Número de operadoras	2
Distribuição de usuários entre as operadoras	Operadora A: 50% Operadora B: 50%
Tipo de escalonamento entre as operadoras	Estático
Tipo de escalonamento entre os usuários	<i>TD scheduler: Round Robin (GBR) e Proportional Fair (NGBR)</i> <i>FD scheduler: Proportional Fair scheduled</i>
Período de relatório CQI sub-banda	80 ms
Tamanho do filtro <i>TD scheduler</i> N_k	250
Tamanho do filtro <i>FD scheduler</i> N_s	30
Fator de ponderação QoS	$w_k = \frac{\text{Prioridade QCI}}{\text{Prioridade QCI máxima}}$

Tabela 12 – Cenários de simulação para o quadro de simulação (i).

Serviço com o qual houve investimento de uma operadora ^a	Cenário	Proporção de usuários utilizando um determinado serviço por operadora			Distribuição de recursos entre as operadoras ^b		
		Operadora A	Operadora B		Caso I	Caso II	Caso III
VoIP ou Web	1	Voip: 0%	Voip: 100%				
		Vídeo: 50%	Vídeo: 50%				
		Web: 100%	Web: 0%				
	2	Voip: 20%	Voip: 80%				
		Vídeo: 50%	Vídeo: 50%				
		Web: 80%	Web: 20%				
Vídeo ou Web	3	Voip: 40%	Voip: 60%				
		Vídeo: 50%	Vídeo: 50%				
		Web: 60%	Web: 40%				
	4	Voip: 50%	Voip: 50%		50% - 50%	40% - 60%	30% - 70%
		Vídeo: 0%	Vídeo: 100%				
		Web: 100%	Web: 0%				
Vídeo ou Web	5	Voip: 50%	Voip: 50%				
		Vídeo: 20%	Vídeo: 80%				
		Web: 80%	Web: 20%				
	6	Voip: 50%	Voip: 50%				
		Vídeo: 40%	Vídeo: 60%				
		Web: 60%	Web: 40%				

^a Uma vez que o serviço de Web necessita de mais recursos, o princípio da simulação é analisar o comportamento de um investimento em VoIP/Web ou Vídeo/Web.
^b Como premissa, a operadora cuja quantidade de recursos é reduzida é aquela que necessita de menos recursos – no caso, a operadora que investe no serviço de VoIP ou *streaming* de vídeo em detrimento de Web.

7.2 Resultados da simulação

O *throughput* e a eficiência das Operadoras A e B no caso I para os diferentes cenários são apresentados nas Figuras 27 (cenário 1), 28 (cenário 2), 29 (cenário 3), 30 (cenário 4), 31 (cenário 5) e 32 (cenário 6). Com o objetivo de exibir o efeito transitório, à medida que os usuários se conectem, os gráficos mostram o tempo de simulação até 5 s. Nas figuras também são evidenciados detalhes do escalonamento de Bloco de Recursos, durante um período de 200 TTIs, para que seja possível notar a dinâmica do compartilhamento e inferir a eficiência de recursos do sistema. No caso, a eficiência é uma relação virtual¹ entre os recursos totais e os recursos utilizados em um TTI, de modo que possa ser interpretada como uma eficiência espectral, embora esta seja inferior à apresentada. Nos gráficos, a operadora A é representada em vermelho e a operadora B é representada em amarelo; o *throughput* total da célula é exibido em cor preta, e, no detalhe da reprodução do escalonamento, os RBs em branco são recursos alocados para uma operadora, mas não utilizados no TTI correspondente.

No cenário 1, Figura 27(a), nota-se a diferença na necessidade de tráfego entre usuários utilizando navegador web e usuários utilizando serviço de VoIP. De acordo com os modelos apresentados no capítulo 6, o serviço de VoIP tem taxas de envio de pacotes constantes, em dois estados diferentes, e muito inferiores às taxas de navegação web HTTP. O *throughput* da operadora A, que contém todos os usuários que utilizam web, é muito maior que o *throughput* da operadora B. Embora a divisão de usuários utilizando *streaming* de vídeo seja igualitária, isso não é suficiente para aproximar a utilização de recursos entre as operadoras, dado que o serviço de vídeo também tem taxas inferiores à web. É possível notar também que, como a distribuição de RB entre operadoras é 50%-50%, metade dos recursos não utilizados visíveis no detalhe do escalonamento são da operadora B, o que tem um efeito em sua eficiência, como mostra a Figura 27(b), muito inferior à eficiência média da operadora B. A eficiência da operadora A varia conforme a estatística do modelo de web, que tem momentos de alto e baixo tráfego. Pelo contrário, a eficiência da operadora B permanece aproximadamente constante durante a simulação.

No cenário 2, Figura 28(a), percebe-se uma elevação do *throughput* da operadora B, embora tenha aproximadamente 1 Mbps menos, em média, que a operadora A. Esse valor representa uma diferença grande, se comparado ao *throughput* do sistema. Portanto, a quota de 20% de usuários utilizando navegação web HTTP não tem efeito evidente sobre o *throughput*, embora possa ser observado um leve aumento na eficiência (Figura 28(b)). A eficiência média da operadora A é inferior ao cenário 1 devido à maior quantidade de usuários utilizando VoIP, e portanto há menor variação no tráfego.

No cenário 3, percebe-se que as duas operadoras tem *throughput* médio aproxima-

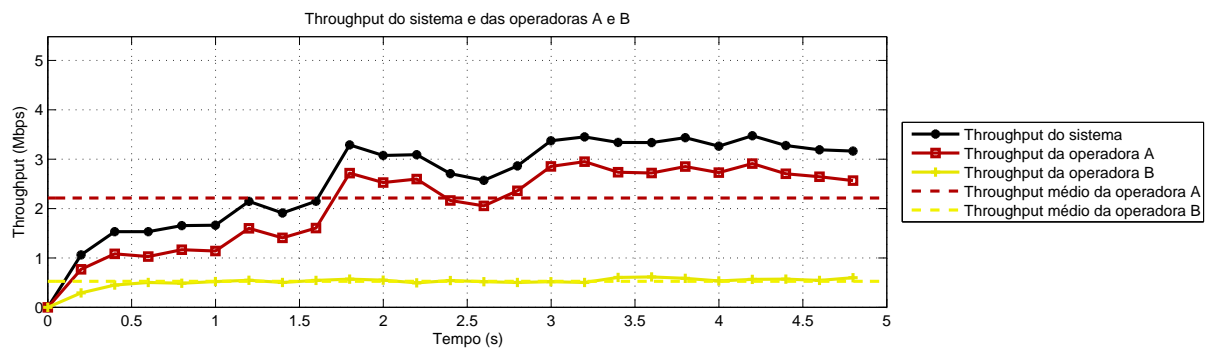
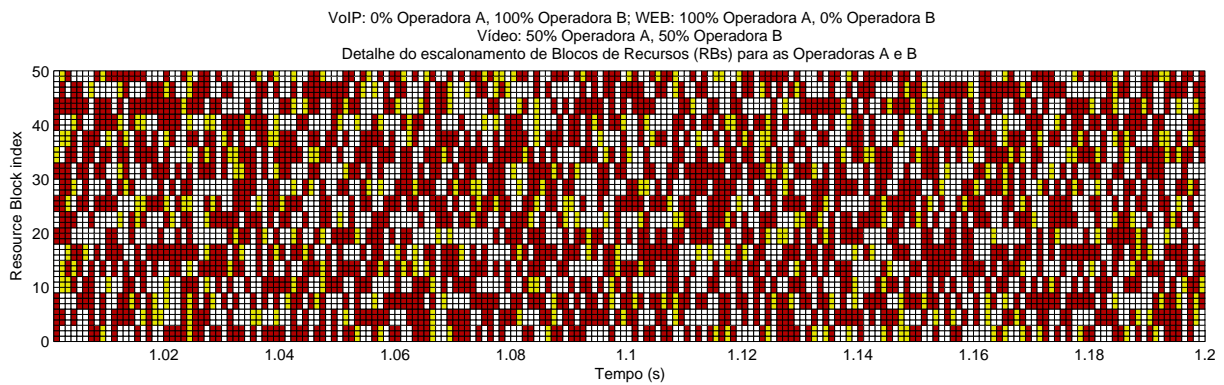
¹ O termo “virtual” refere-se aos VRBs (*Virtual Resource Blocks*), utilizados na alocação de recursos e mapeados para PRBs (*Physical Resource Blocks*) na camada física, segundo a norma [10].

damente iguais, como pode ser visto na Figura 29(a). Infere-se que a proporção 60%-40% é suficiente para manter a igualdade em termos de velocidade de transmissão. Ainda assim, a eficiência da operadora B (Figura 29(b)) continua menor que a eficiência da operadora A, em média, durante o período de simulação. Essa situação ainda é consequência da maior quantidade de usuários de VoIP, o que leva a crer que em momentos de tráfego médio (no caso com 50 usuários) a operadora que investe no serviço de VoIP em detrimento do serviço de web perde eficiência de RB, e em decorrência, o investimento não gera o retorno esperado.

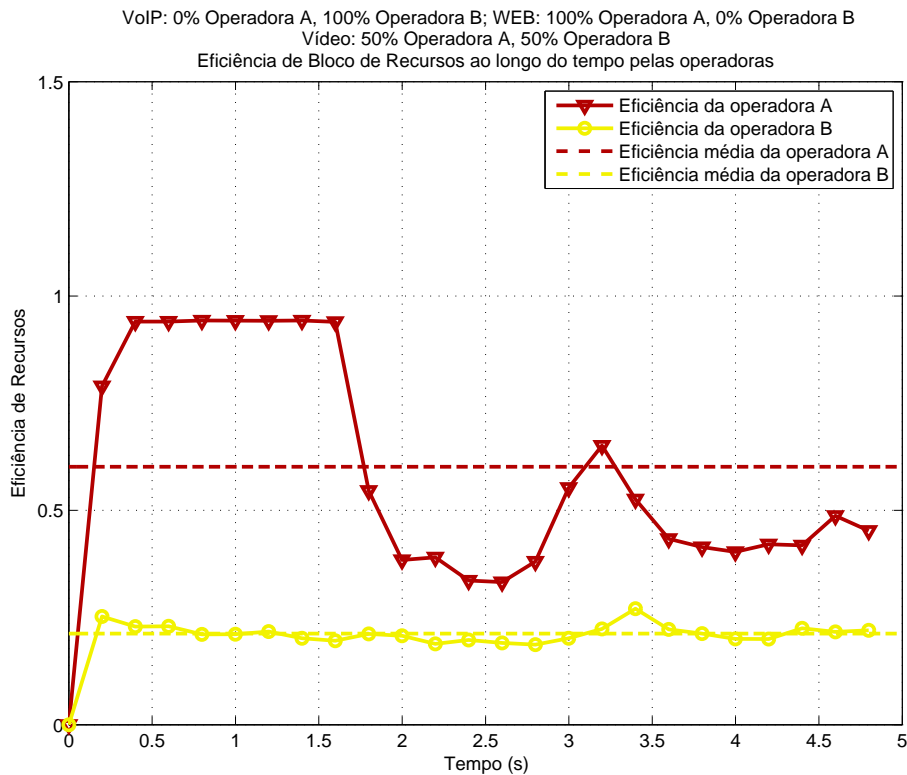
Com relação à comparação entre o investimento em *streaming* de vídeo ou web, a situação tem uma mudança na eficiência, como comprova a Figura 30. Ainda que a taxa de transmissão da operadora B, que investe em vídeo, seja bem menor que a taxa da operadora A, a eficiência entre as duas é aproximadamente igual, em média. Na Figura 31, onde a operadora B mantém uma fração de 1/5 de usuários web, o *throughput* entre as duas operadoras é igual, e a eficiência da operadora que investe em vídeo permanece maior que a outra operadora durante todo o período. Por fim, considerando a Figura 32, confirma-se que a operadora B tem melhor rendimento investindo em vídeo que em VoIP.

Para os casos II e III, foram criados gráficos resumidos que comparam o desempenho médio das operadoras, como mostram as Figuras 33 e 34 (*throughput* e eficiência, respectivamente). De acordo com os gráficos, percebe-se que o comportamento da relação entre os *throughputs* da operadora A e B não tem modificações extremas quando a operadora B, que tem um tráfego menor, tem acesso a um percentual inferior de recursos. A taxa de transmissão da operadora A se mantém, na maior parte dos cenários, superior à operadora B, com excessão de alguns momentos nos cenários 3 e 6 onde a proporção de serviços é próxima. A eficiência da operadora B, como esperado, aumenta à medida que esta tem acesso a menos recursos. O resultado é mais evidente nos casos em que a operadora investe em serviço de vídeo; no caso III, a eficiência chega a 80%, sem corromper o *throughput*. Portanto, percebe-se que é possível que a operadora diminua os custos pagando por menor parcela do espectro, mantenha a qualidade do serviço e alcance uma eficiência alta mesmo em uma situação de médio tráfego.

Essa análise continua apropriada ao aumentar o tráfego do sistema, como mostra as Figuras 35 e 36. Foram simulados os cenários em que há uma parcela pequena de usuários utilizando web na operadora B (cenários 2 e 5). No caso do serviço de VoIP, Figura 35, tanto a eficiência quanto o *throughput* tem poucas variações, enquanto a eficiência da operadora A aumenta devido à maior quantidade de usuários web, e consequentemente, uma necessidade maior de recursos. No caso do serviço de vídeo, na Figura 36, a eficiência da operadora B se mantém maior ou igual à operadora A, o que enfatiza o fato de que um investimento nesse serviço é válido.

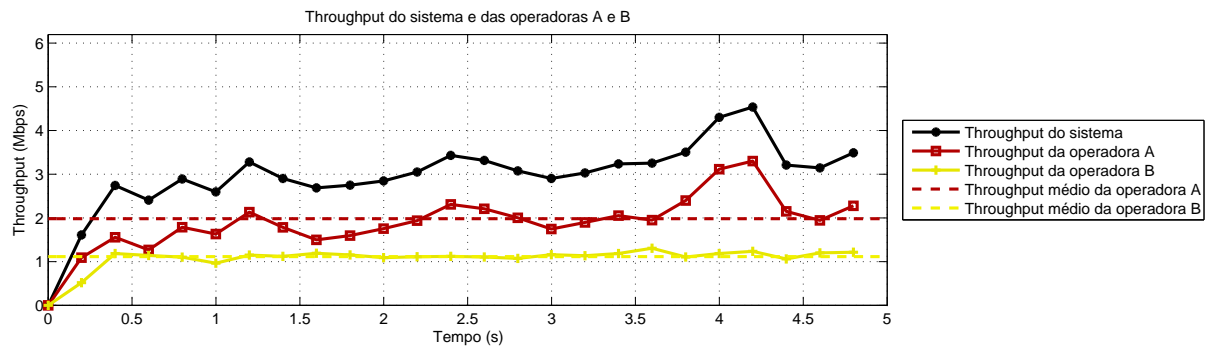
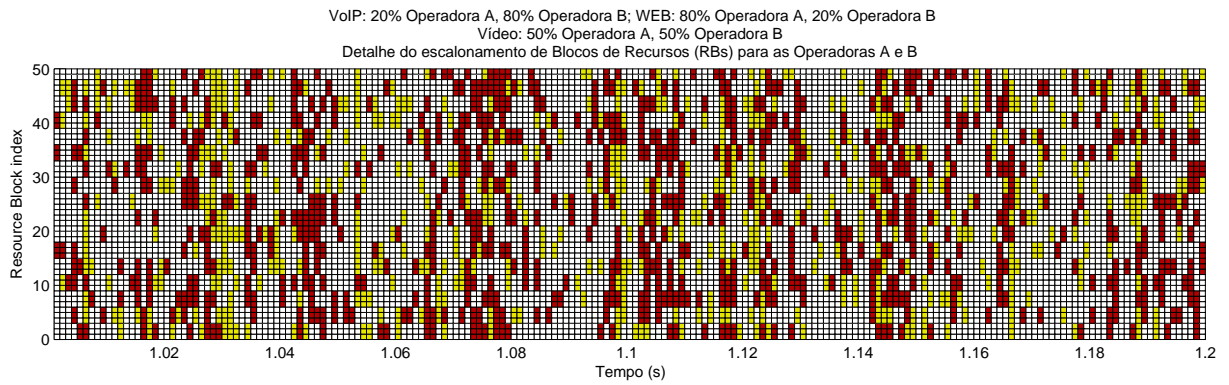


(a)

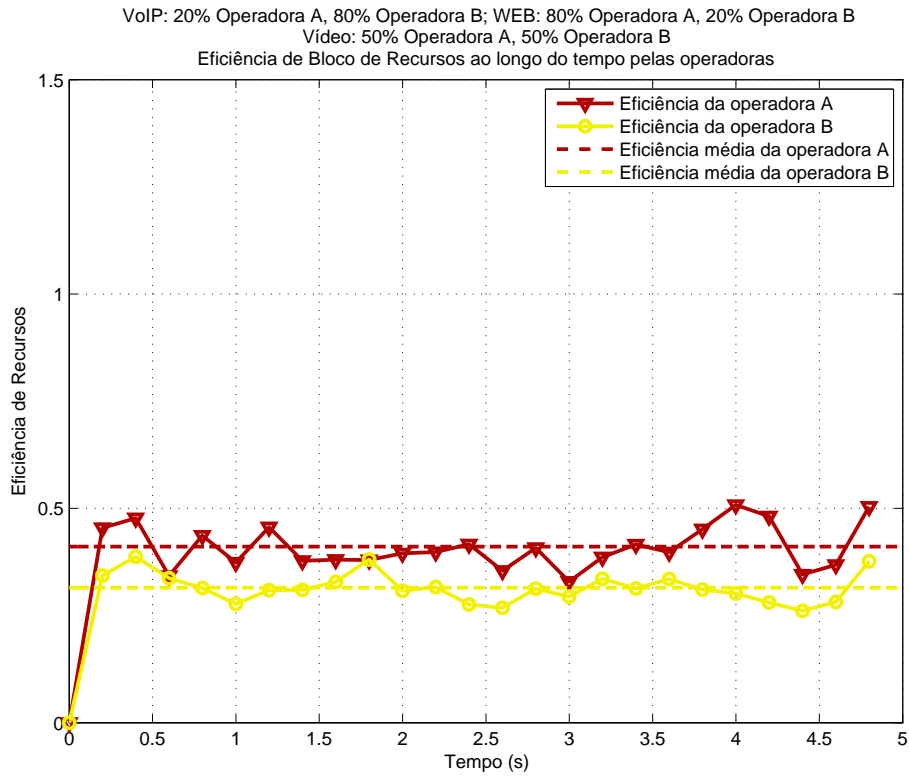


(b)

Figura 27 – Cenário 1 – caso I: (a) *Throughput* das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.



(a)



(b)

Figura 28 – Cenário 2 – caso I: (a) *Throughput* das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.

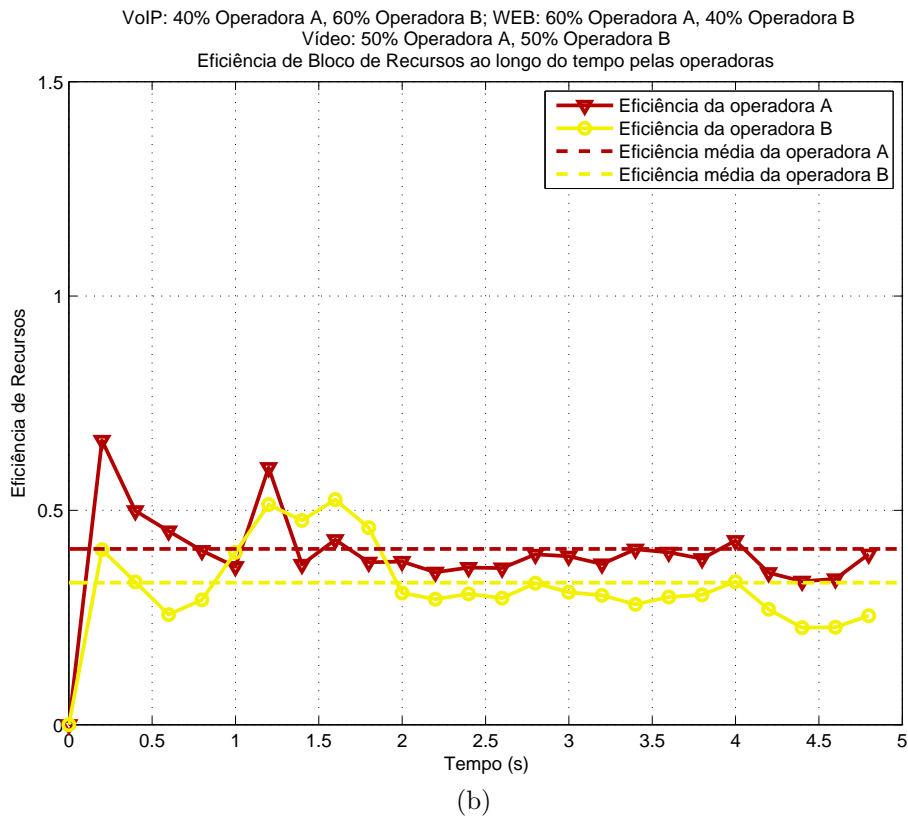
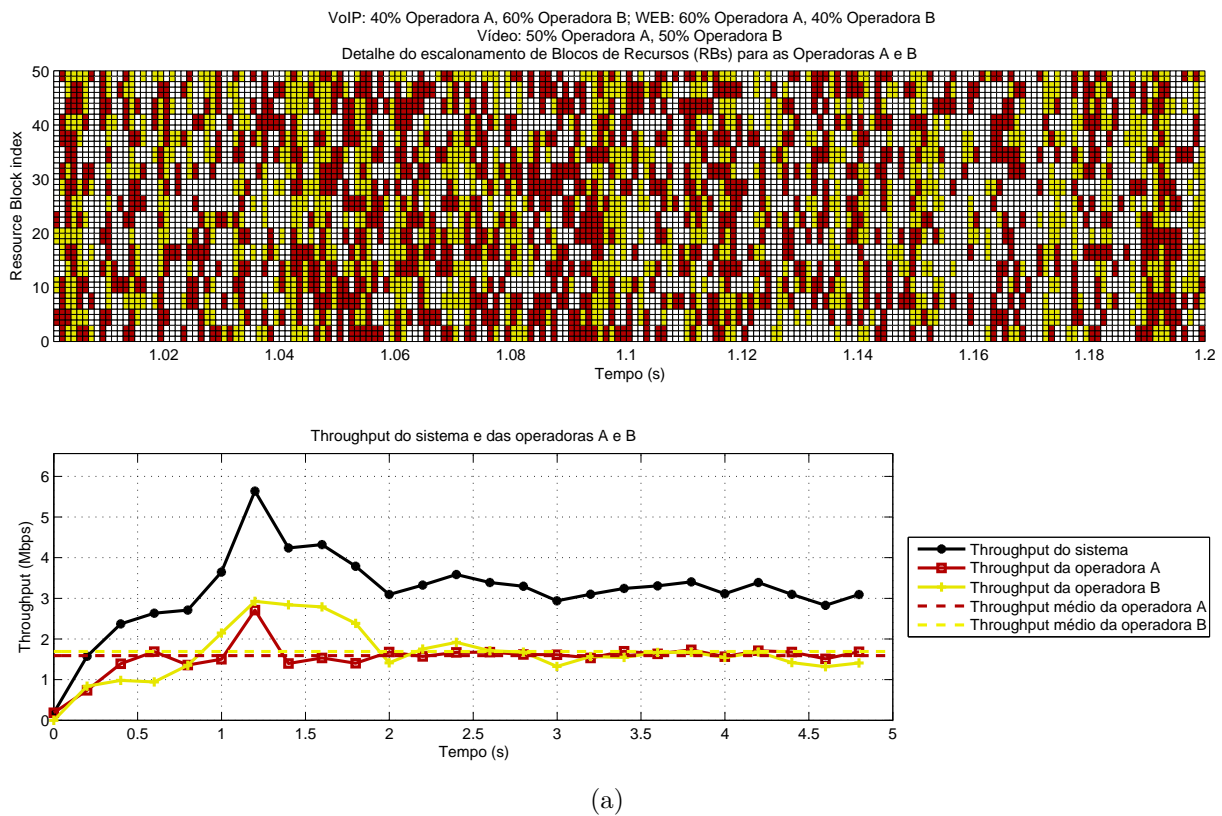


Figura 29 – Cenário 3 – caso I: (a) *Throughput* das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.

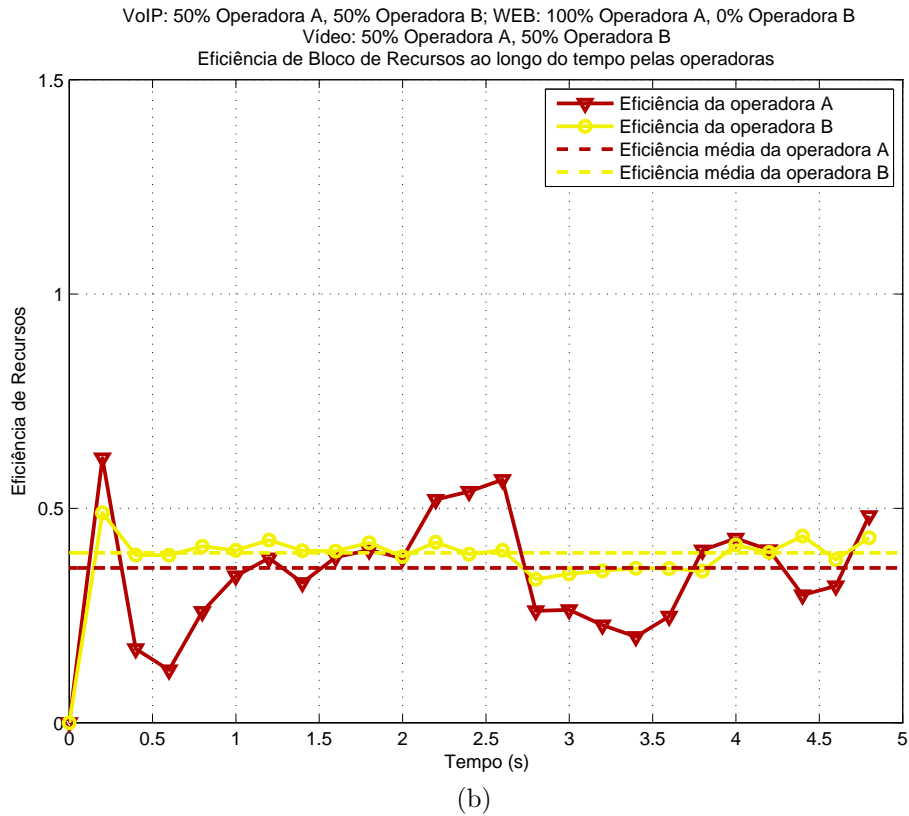
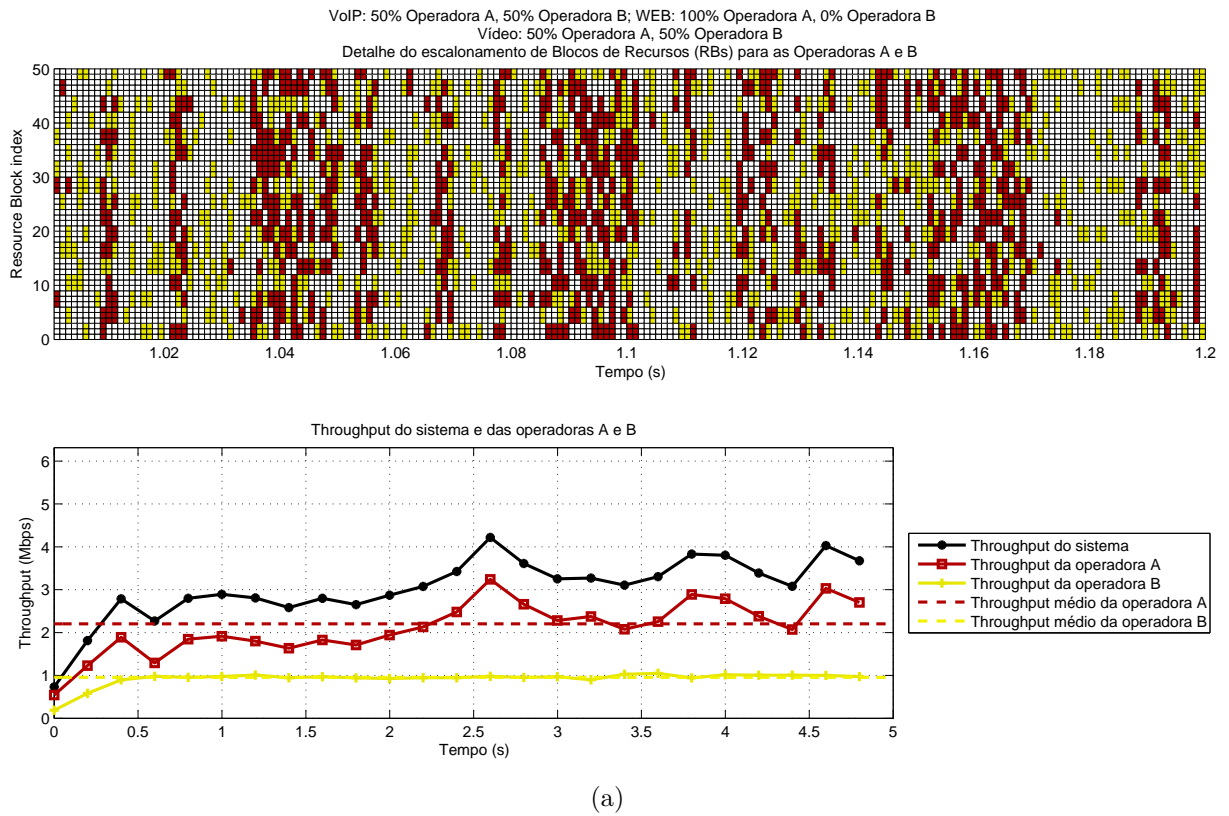


Figura 30 – Cenário 4 – caso I: (a) *Throughput* das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.

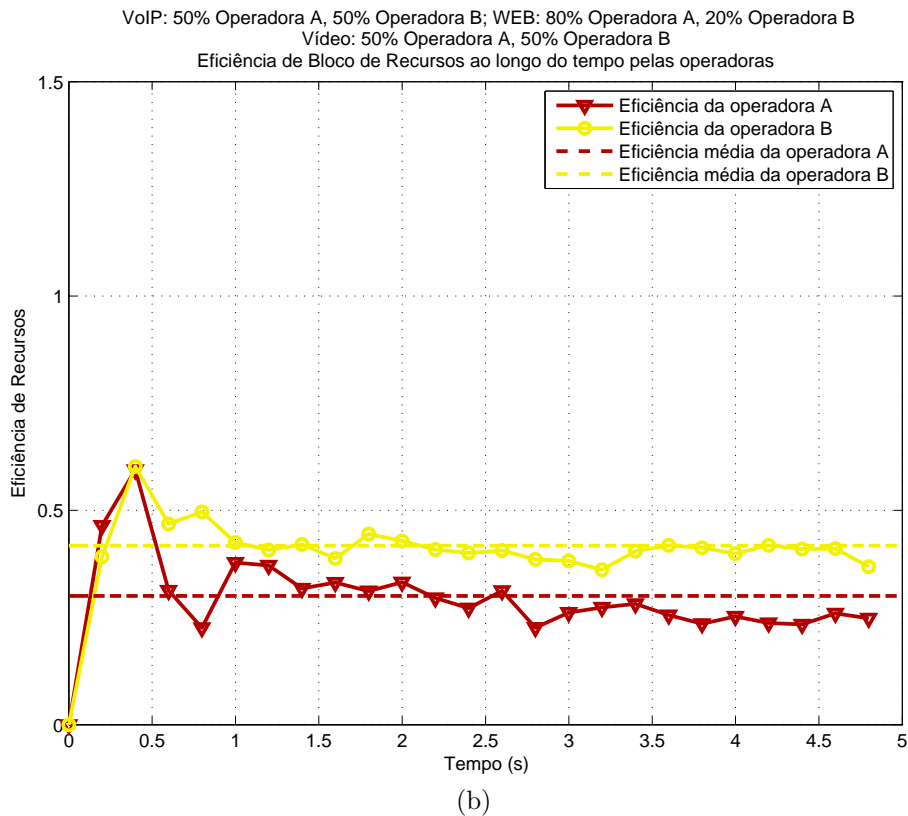
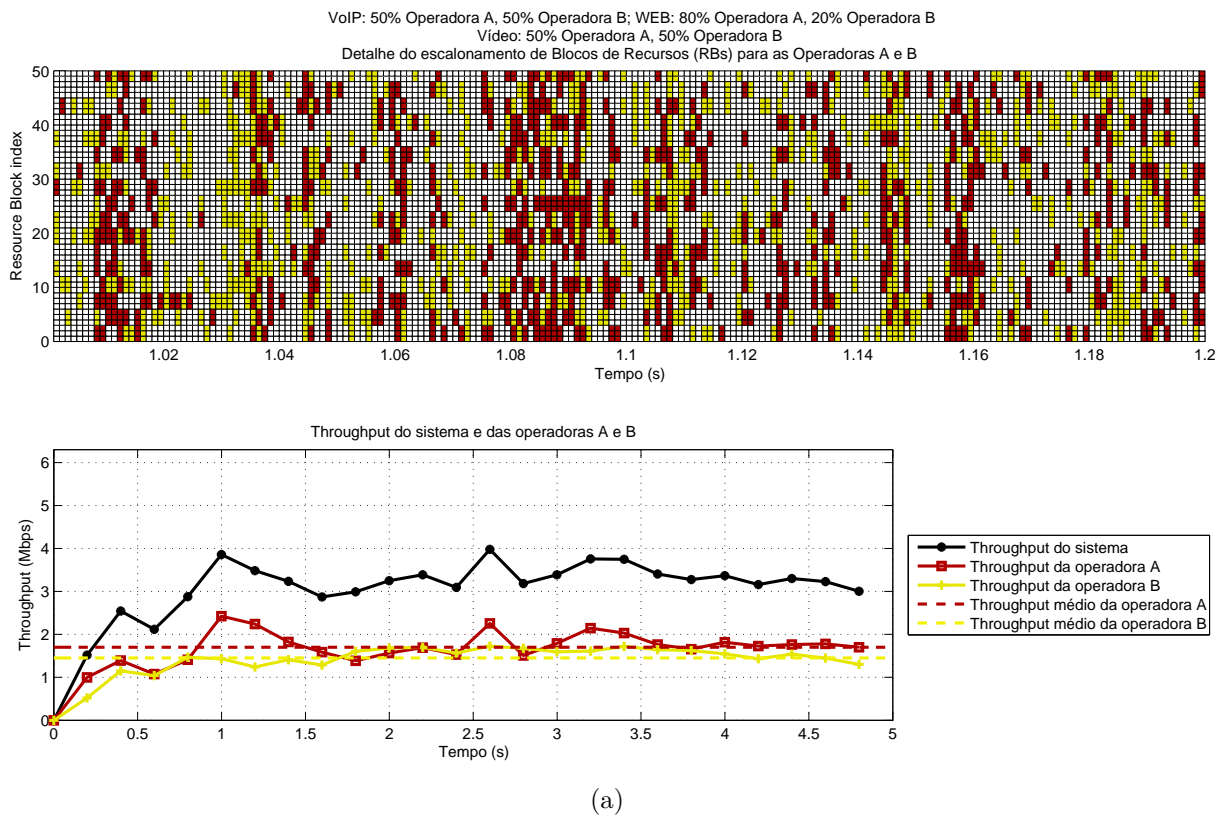


Figura 31 – Cenário 5 – caso I: (a) *Throughput* das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.

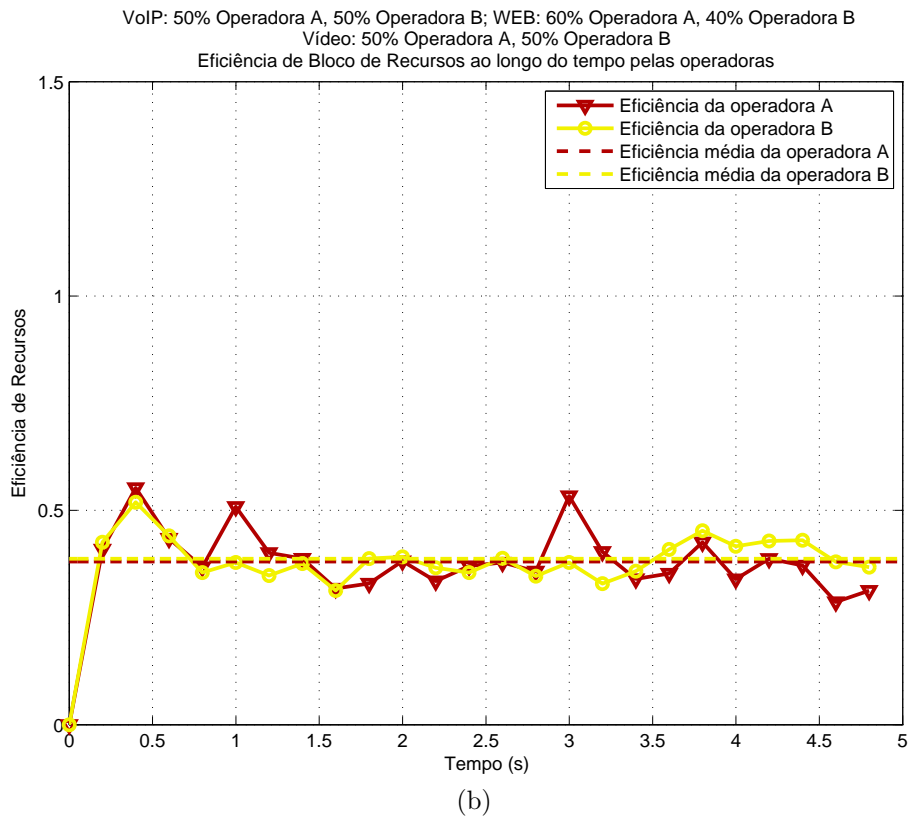
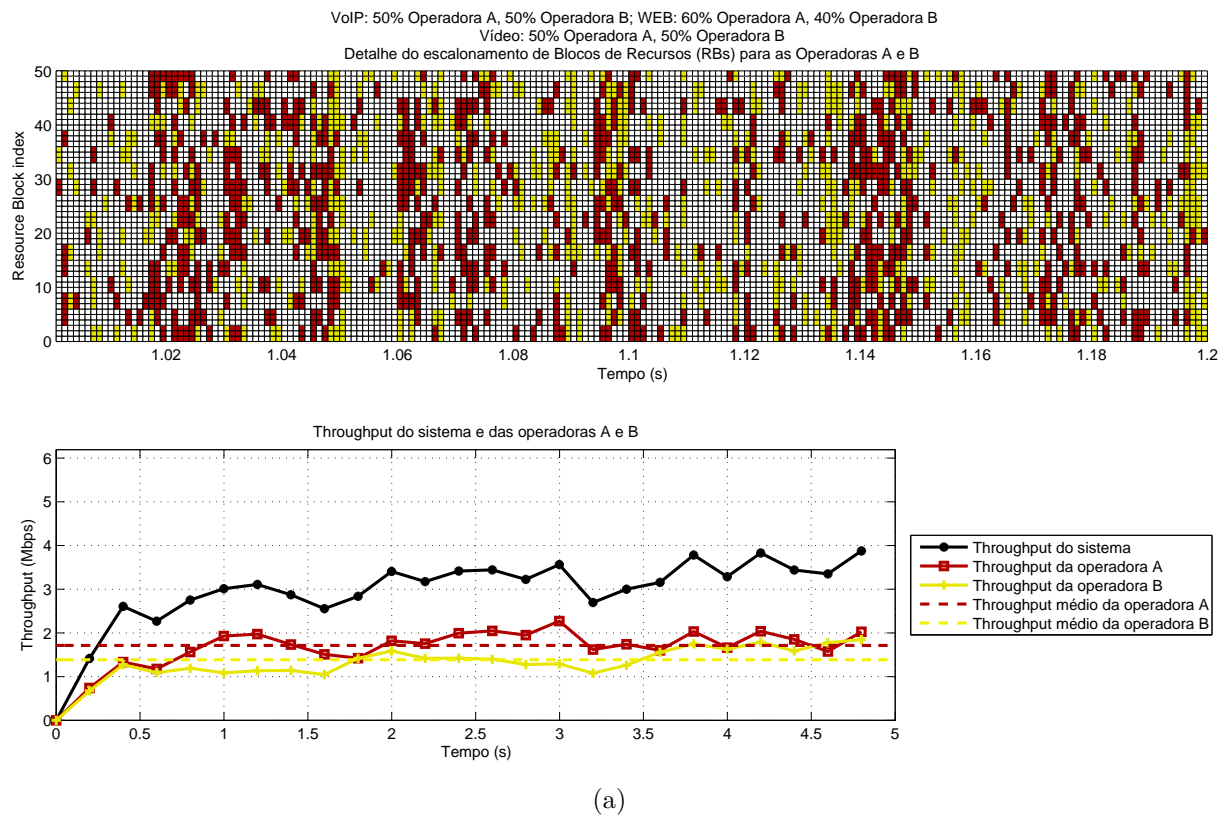


Figura 32 – Cenário 6 – caso I: (a) *Throughput* das Operadoras A e B e detalhe do escalonamento de Blocos de Recursos (RBs). (b) Eficiência de Blocos de Recursos (RBs) das Operadoras A e B.

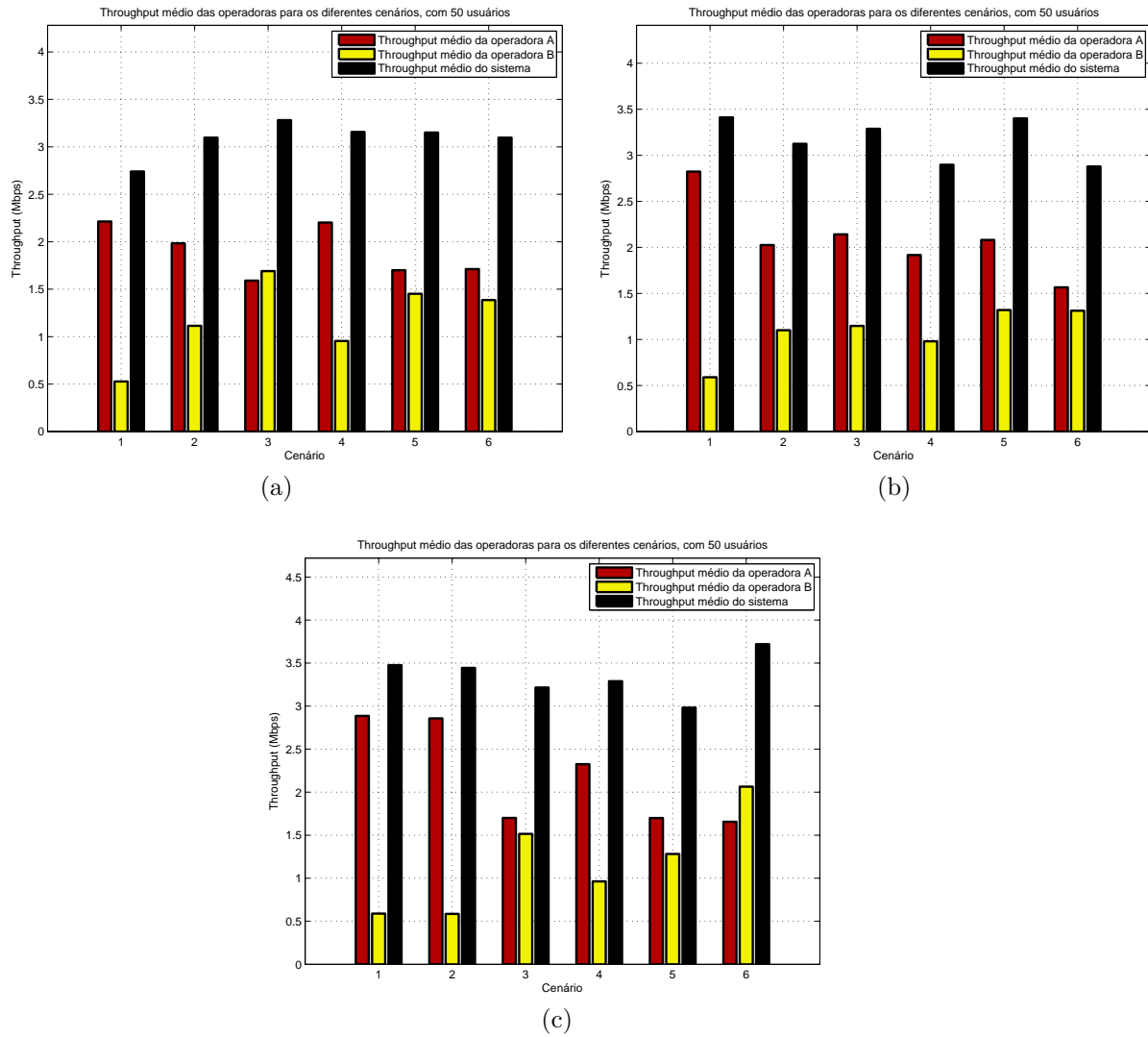


Figura 33 – *Throughput* médio das operadoras para os diferentes cenários, com 50 usuários, no caso (a) I, (b) II e (c) III.

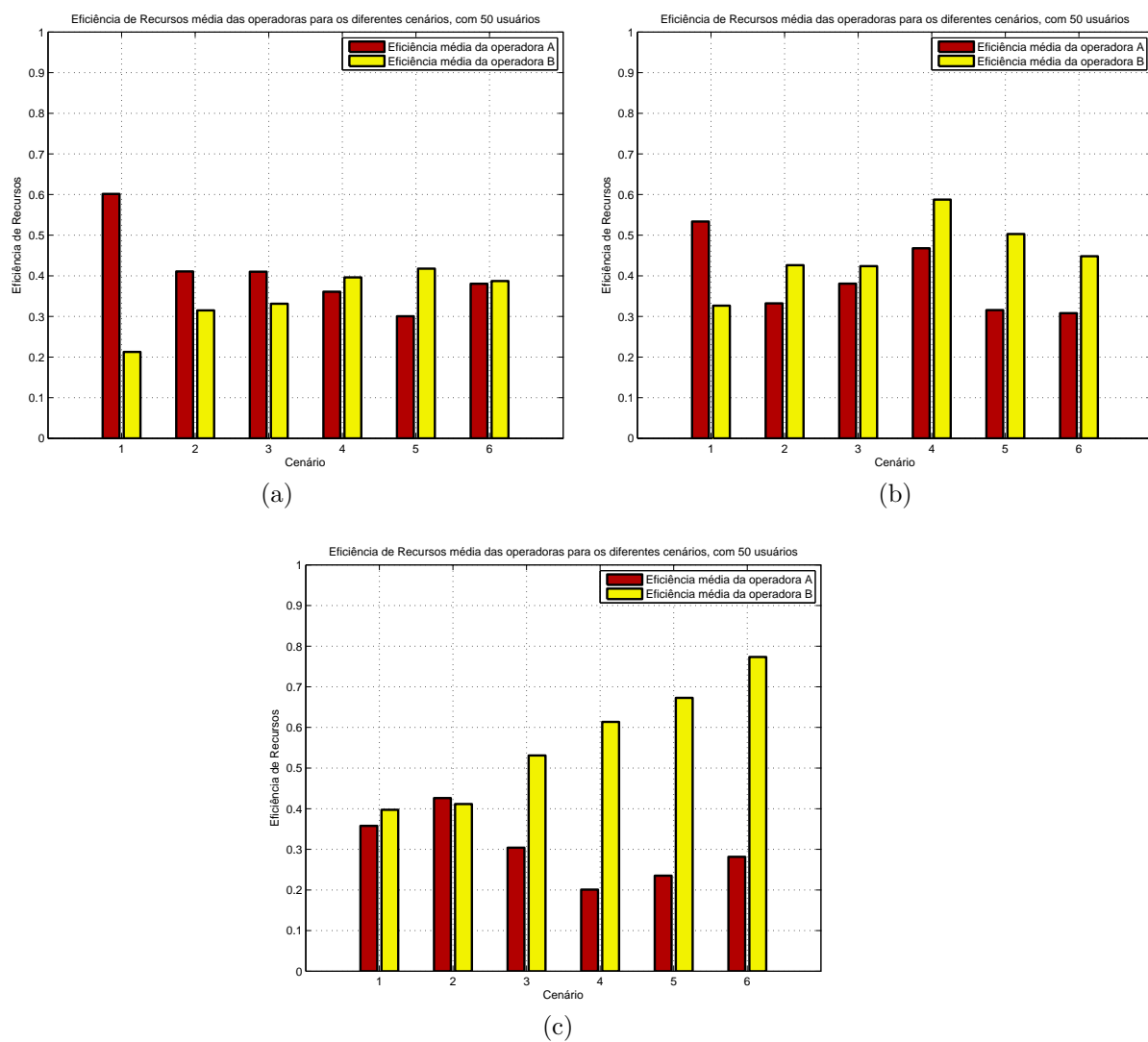


Figura 34 – Eficiência de Recursos média das operadoras para os diferentes cenários, com 50 usuários, no caso (a) I, (b) II e (c) III.

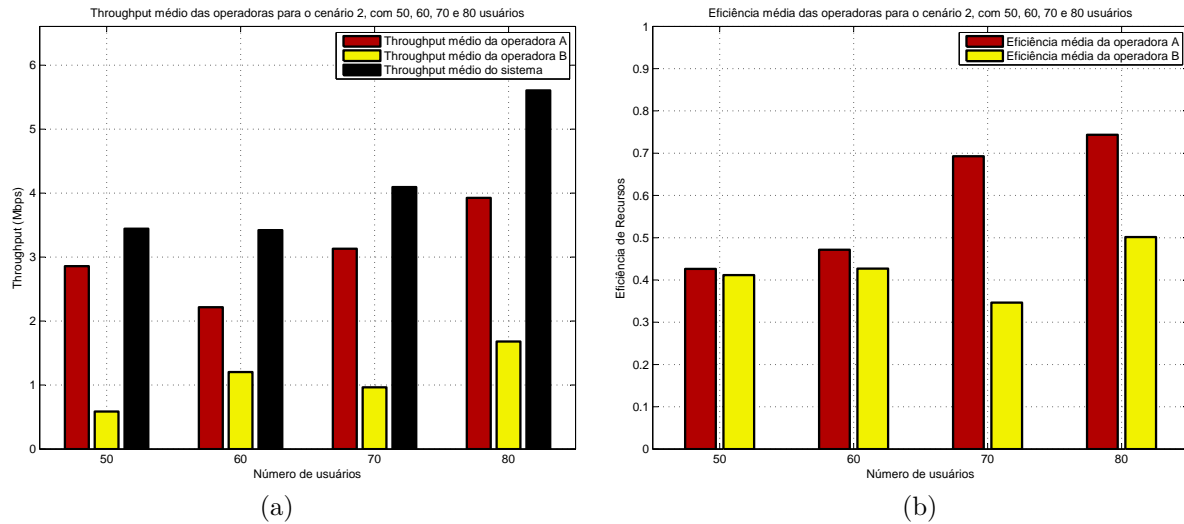


Figura 35 – Comparação entre o (a) *Throughput* e a (b) eficiência média de recursos das operadoras para o cenário 2 – caso I, para diferentes números de usuários.

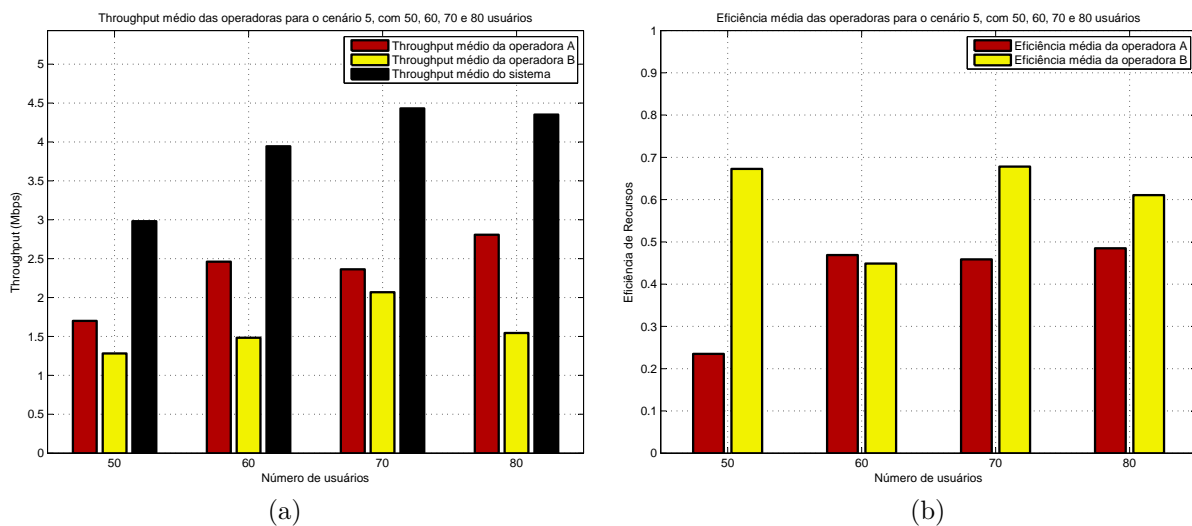


Figura 36 – Comparação entre o (a) *Throughput* e a (b) eficiência média de recursos das operadoras para o cenário 5 – caso I, para diferentes números de usuários.

7.3 Aplicação da Teoria dos Jogos

O modelo de concorrência simulado na seção anterior prevê uma situação em que uma operadora investe em um determinado serviço (por exemplo, com descontos ou planos) e consequentemente aumenta a proporção de usuários utilizando este serviço específico. De maneira a tornar igualitária a proporção de usuários na célula para as duas operadoras, a simulação foi realizada diminuindo a proporção desta mesma operadora em outro serviço (estabelecido como web *browsing*, em razão de sua alta requisição de dados), de forma que fosse possível analisar diferentes cenários de concorrência.

Esta situação de compensação de proporção entre duas operadoras é válida, considerando um cenário financeiro de duas empresas: como um modelo de concorrência imperfeita, uma operadora não apenas tem consciência de que suas decisões afetam o CAPEX e OPEX, como também nota que é afetada pelas decisões dos concorrentes. Portanto, em uma situação de investimento de uma operadora, é apropriado supor que a outra operadora também irá investir em algo. Este é ainda um dos desafios que devem ser considerados ao firmar acordos de coexistência.

Segundo [26], quando o comportamento de uma interação entre agentes é estratégico e racional, e cada agente está interagindo diretamente com o seu meio e com outros agentes, então o conjunto de regras que guiam a interação assim como o resultado desse convívio é denominado *jogo*. O estudo correspondente é conhecido como *teoria dos jogos*. Esta seção se baseia nas regras desta teoria.

Como o contexto é um cenário de compartilhamento, inerentemente as operadoras buscam uma situação de harmonia. Dessa forma, serão consideradas, além de algumas das situações observadas na seção anterior, o esquema onde uma das operadoras investe em VoIP e outra operadora investe no serviço de *streaming* de vídeo. Desse modo, todos os cenários ao alcance do simulador são envolvidos, para que seja possível observar os resultados do jogo em sua totalidade.

Seguindo a técnica da teoria dos jogos, a descrição do jogo está completa assim que sejam caracterizadas todas as possíveis ações (estratégias) do jogo e todos os prêmios, ou *payoffs*. Com relação às estratégias, no primeiro jogo considerado serão englobadas as seguintes, para as duas operadoras:

- (i) Investir no serviço de VoIP;
- (ii) Investir no serviço de vídeo *streaming*;
- (iii) Investir no serviço de web *browsing* HTTP.

Para reduzir a quantidade de informação, as simulações foram realizadas no caso I (proporção de 50% - 50% de recursos entre as operadoras) e foi estabelecido que a

estratégia *investir em um serviço* significa que 80% de seus usuários utilizarão este tipo de serviço (os cenários intermediários da seção anterior), se a outra operadora não investir no mesmo serviço. Além disso, foi utilizada a quantidade de usuários máxima testada anteriormente (80 usuários), para que o tráfego da rede aumente e seja possível observar essa característica na eficiência de recursos. A Tabela 13 mostra os diferentes cenários simulados com esses parâmetros. Na Figura 37, são apresentadas as eficiências para as diferentes estratégias, em formato gráfico.

Tabela 13 – Relação entre as estratégias de investimento das operadoras, a proporção de usuários e a eficiência média obtida no simulador.

ESTRATÉGIA DE INVESTIMENTO		PROPORÇÃO DE USUÁRIOS (%)						EFICIÊNCIA	
A	B	VoIP		Vídeo		Web		A	B
		A	B	A	B	A	B		
VoIP	VoIP	50	50	50	50	50	50	0,500	0,500
Vídeo	VoIP	20	80	80	20	50	50	0,938	0,365
Web	VoIP	20	80	50	50	80	20	0,743	0,501
VoIP	Vídeo	80	20	20	80	50	50	0,365	0,938
Vídeo	Vídeo	50	50	50	50	50	50	0,500	0,500
Web	Vídeo	50	50	20	80	80	20	0,484	0,610
VoIP	Web	80	20	50	50	20	80	0,501	0,743
Vídeo	Web	50	50	80	20	20	80	0,610	0,484
Web	Web	50	50	50	50	50	50	0,500	0,500

No caso de as operadoras escolherem estratégias iguais, foi pressuposto que não haveria modificação na proporção de serviço em cada operadora. Neste caso, não há como prever a eficiência média de uma operadora específica, por conta da distribuição estatística: alguns momentos o tráfego da operadora pode estar reduzido, e outras vezes elevado. Entretanto, seria razoável supor que, na média, a eficiência das operadoras seja a metade da eficiência total alcançável. De fato, a média entre as eficiências das duas operadoras tem variações em torno de 0.5, para todas as simulações realizadas.

Com relação aos *payoffs* do jogo, será estabelecido uma moeda fictícia representada pela eficiência:

$$\text{Eficiência} = 1 \rightarrow \text{payoff} = 1000$$

De acordo com isso, a Tabela 14 mostra a representação do jogo na forma normal de matriz de *payoffs*. Nota-se que o jogo é simétrico, o que significa que o pagamento para os jogadores em uma estratégia particular depende somente da estratégia escolhida, e não de quem está jogando.

É fácil notar que a escolha da estratégia de investir em vídeo supera as outras estratégias, sem considerar ainda o segundo jogador; os *payoffs* dessa estratégia são mai-

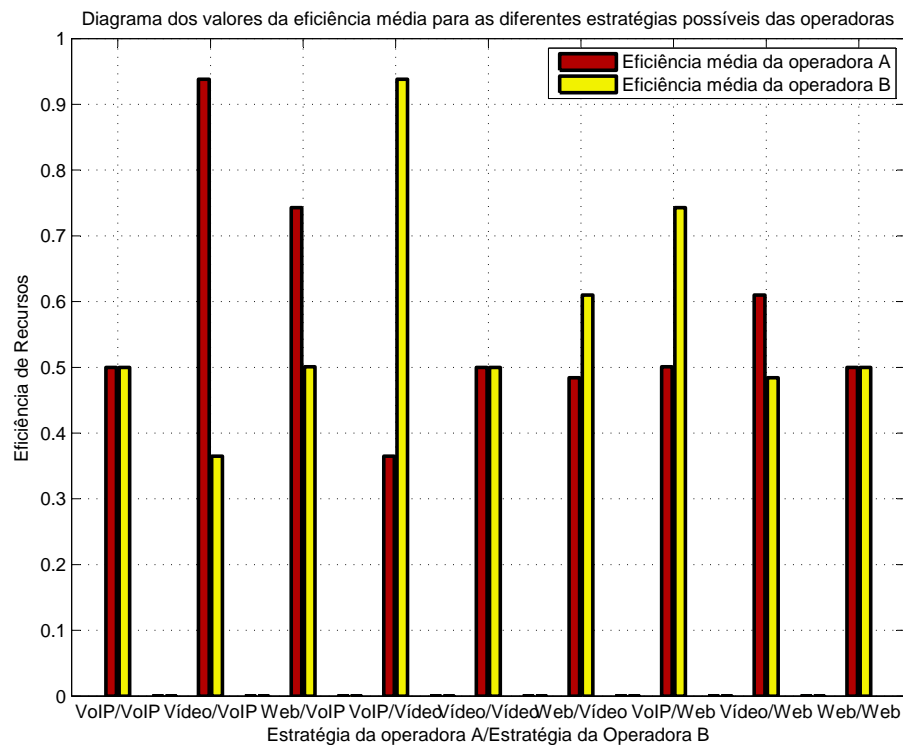


Figura 37 – Gráfico em barras representando a eficiência média alcançada por cada operadora em cada uma das estratégias possíveis, no primeiro jogo.

ores em todas as situações simuladas, e é a estratégia preferida por uma das operadoras, independentemente da estratégia adotada pela outra. Esse caso representa, portanto, a estratégia dominante dos cenários simulados.

Enfatizando essa escolha, a Figura 38 mostra a representação extensiva do jogo, se este é um jogo sequencial. Se uma das operadoras é capaz de adotar sua estratégia antes da outra, então o jogo se inicia da esquerda para a direita a partir da escolha da estratégia da primeira operadora. Por exemplo, se a operadora A inicia o jogo e escolhe VoIP como investimento, a operadora B já sabe a estratégia adotada por A, e escolherá o maior *payoff*, no caso, investimento em vídeo. No segundo e terceiro ramo, o resultado é igual: a operadora B sempre escolherá o maior pagamento, e o resultado sempre será o serviço de vídeo.

De acordo com isso, cada operadora já sabe a estratégia tomada pela outra. Portanto, a escolha da estratégia 2 para ambas as operadoras é o *equilíbrio de Nash* para esta simulação.

Considerando agora um segundo jogo, onde a operadora B não apenas deseja, mas tem necessidade de compartilhar a estrutura de rede com a operadora A (como por exemplo, uma empresa que gostaria de tornar-se uma MVNO). Se são considerados somente esses três tipos de serviço, então sabe-se pelo resultado do jogo anterior que a operadora A teria maior justificativa para um investimento em vídeo. Se a operadora B

Tabela 14 – Representação matricial do primeiro jogo entre as operadoras A e B.

		Operadora B		
		VoIP	Vídeo	Web
Operadora A	VoIP	500,500	365,938	501,743
	Vídeo	938,365	500,500	610,484
	Web	743,501	484,610	500,500

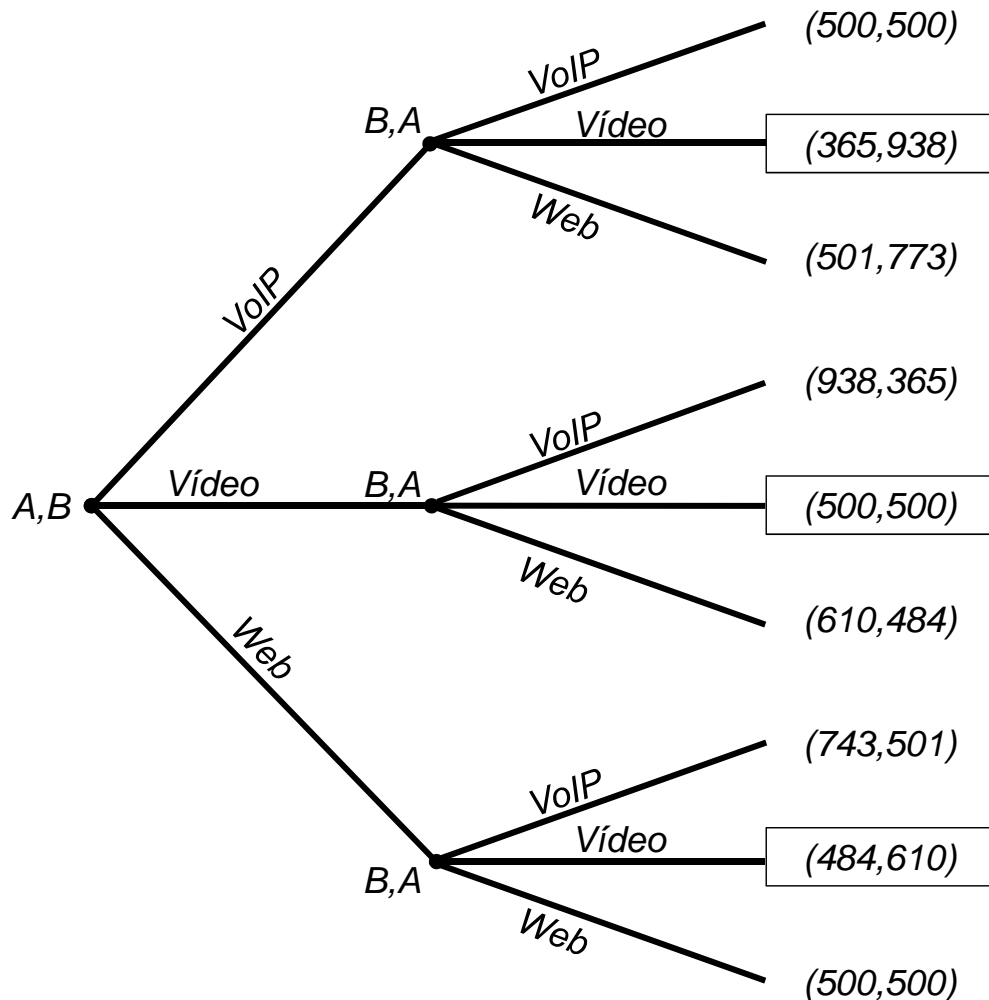


Figura 38 – Representação extensiva do primeiro jogo, em formato de árvore, no caso de um jogo sequencial.

também investe em vídeo, ambas estariam provendo serviço de forma igual aos usuários, então a partilha de rede não tem vantagem direta oriunda da divisão de espectro, somente da divisão de infraestrutura. As estratégias, no entanto, podem ser modificadas de forma a aproveitar as vantagens da divisão de espectro para ambas as operadoras.

Dado então que a operadora A é uma MNO que oferece promoções para *streaming* de vídeo, e a operadora B tem acesso às estratégias:

- (i) Investir no serviço de VoIP;

- (ii) Investir no serviço de web *browsing* HTTP.

Então se a situação do primeiro jogo resulta em pouca eficiência para a operadora B. Assim, duas outras estratégias para a primeira operadora serão consideradas:

- (i) Realizar um acordo de compra de 10% do espectro da operadora B;
 (ii) Realizar um acordo de compra de 20% do espectro da operadora B;

Na Figura 39, mostra-se o gráfico de barras contendo as eficiências para as estratégias supostas. Segundo a moeda fictícia concebida, a representação matricial do jogo é mostrada na Tabela 15.

Nessa segunda situação, percebe-se claramente que os *payoffs* são mais igualitários, o que é esperado para uma circunstância de RAN *sharing*. Com auxílio da Figura 40, que mostra as representações extensivas no caso de uma das operadoras escolherem sua estratégia inicialmente, pode-se encontrar o equilíbrio de Nash para o jogo:

- No lado da operadora A: sabendo que a operadora B investirá em Web ou VoIP se o contrato de compra especificar 10 ou 20% respectivamente, a operadora A decide comprar 10% apenas;
- No lado da operadora B: Sabendo que comprar 10% é a estratégia dominante para a operadora A, B escolhe o melhor *payoff*, ou seja, investir no serviço de Web.

Portanto, o resultado deste jogo específico é:

- A operadora A, que investe no serviço de *streaming* de vídeo, compra 10% dos recursos da operadora B;
- A operadora B investe no serviço de navegação Web e vende 10% dos seus recursos para a operadora B.

Tabela 15 – Representação matricial do segundo jogo entre as operadoras A e B.

		Operadora B	
		VoIP	Web
Operadora A	Vender 10%	611,521	555,633
	Vender 20%	504,719	355,626

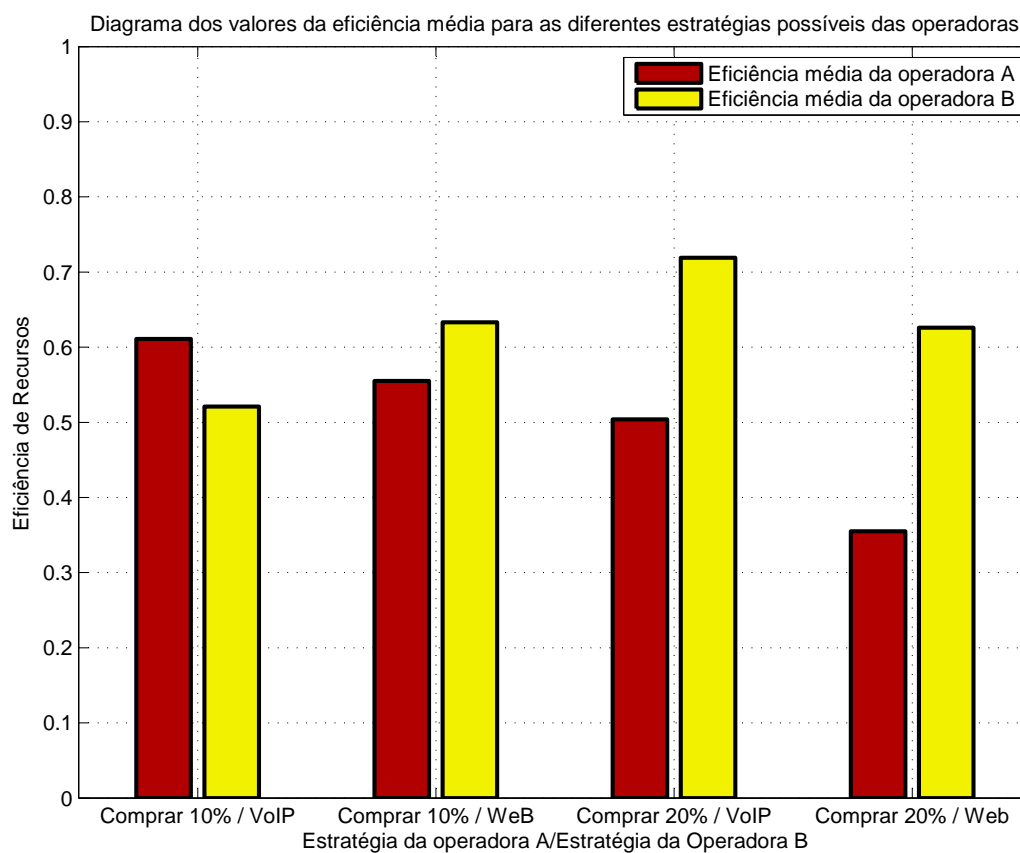
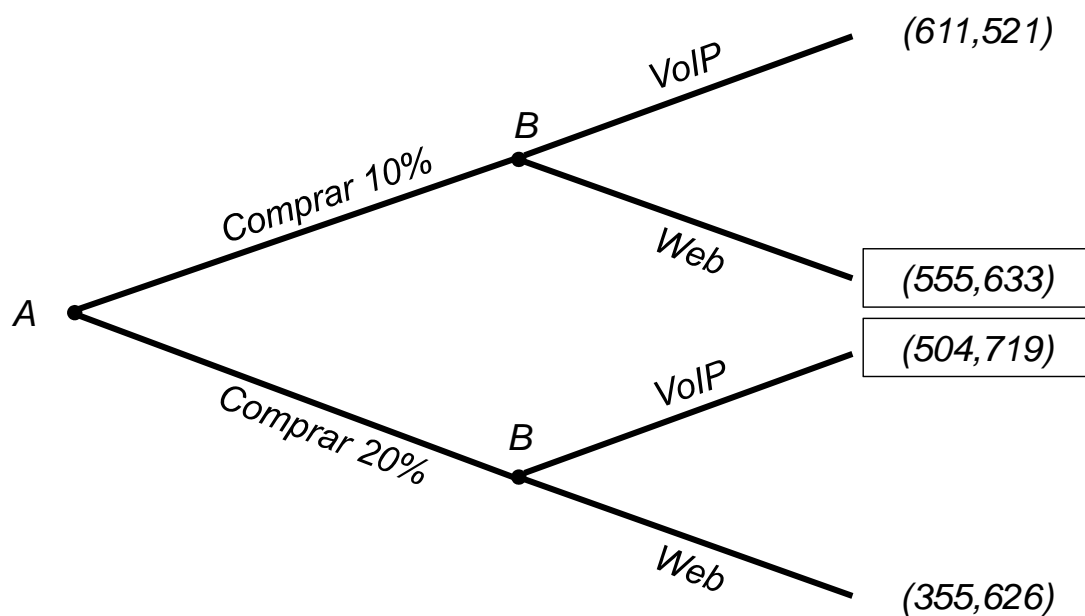
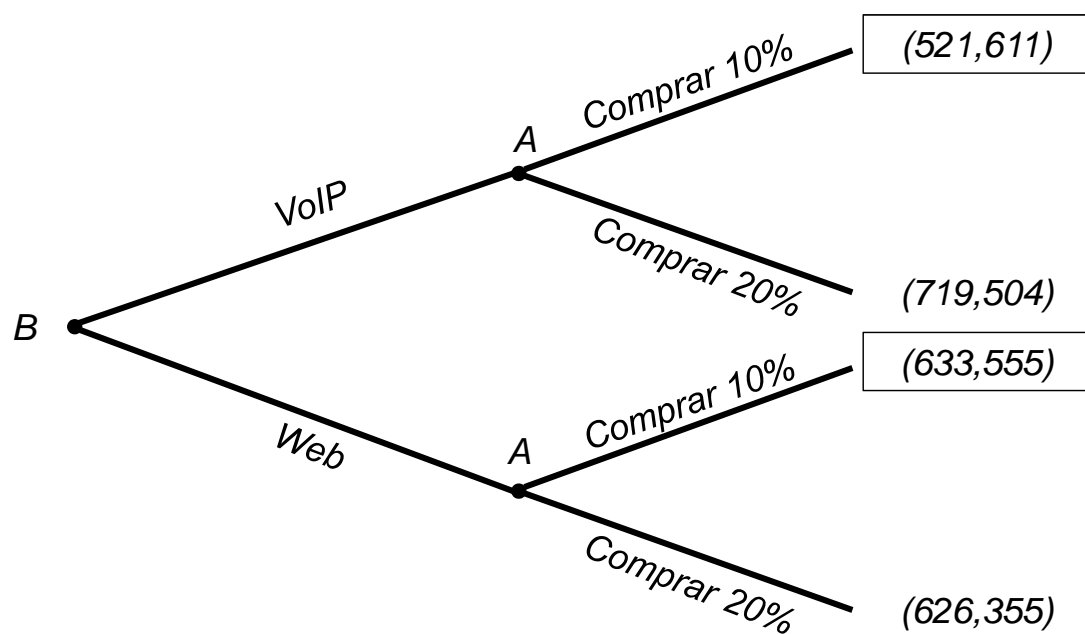


Figura 39 – Gráfico em barras representando a eficiência média alcançada por cada operadora em cada uma das estratégias possíveis, no segundo jogo.



(a)



(b)

Figura 40 – Representação extensiva do segundo jogo, em formato de árvore, no caso de um jogo sequencial, se a decisão inicial é da operadora (a) A ou (b) B.

8 Conclusões

Conforme já evidenciado em algumas pesquisas, os altos custos operacionais e baixas margens de lucro das redes celulares atuais levaram a várias empresas de telecomunicações a migrarem para uma situação de mudança radical, o compartilhamento de infraestrutura de rede. À medida que os sistemas celulares avançam de redes dominadas por voz para redes dominadas por dados, essa estratégia converte-se de uma mudança radical à uma necessidade. Este trabalho apresentou alguns resultados de simulações em diferentes cenários de integração, no caso especial de compartilhamento de RAN entre duas MNOs.

Acerca dos resultados obtidos, fica óbvio que existe influência da proporção de de serviços utilizados pelas operadoras na mesma célula. Foram apresentados dados em formato gráfico que indicam que se esse percentual for diferente para as duas MNOs, é possível que haja enorme contraste em suas eficiências espectrais. Em termos financeiros, uma operadora ganha em prejuízo da outra, pois embora ambas reduzam custos de infraestrutura ao realizarem o compartilhamento, somente uma das empresas aproveitam efetivamente os recursos disponíveis para prover serviço.

Entretanto, esse panorama não é o objetivo do RAN *sharing*. Assim como mencionado anteriormente, um dos desafios desse método de redução de custos é produzir benefícios para todos os envolvidos. Dessa forma, uma conclusão obtida nesse trabalho é que há a necessidade do emprego de estratégias financeiras que acarretem no lucro para ambas MNOs. Por exemplo, uma operadora que necessite de maior quantidade de RBs devido ao tipo de tráfego (por exemplo, navegação web) pode firmar acordos com a outra operadora com menor exigência de espectro (como a que provê mais serviço de VoIP) com o propósito de comprar parte de seus recursos. Essa situação foi ilustrada nos resultados, quando a proporção de alocação de recursos entre as operadoras foi variada – em especial no caso estudado com o auxílio da teoria dos jogos.

Considerando esse caso, é relevante advertir que o estudo não sugere o investimento no cenário resultante da teoria dos jogos. Este desfecho foi referente ao evento específico simulado, sob as circunstâncias detalhadas; existem muitas opções que podem ser consideradas, e cada situação requer uma avaliação especial.

Assim, o conjunto de cenários simulados neste trabalho ainda não forma uma análise definitiva para a circunstância. O contexto do RAN *sharing* é muito amplo, e o simulador implementado para obtenção de dados não tem a capacidade de simulação de softwares utilizados profissionalmente. À vista disso, não é possível retirar deste trabalho soluções absolutas para o problema; por outro lado, este estudo pode fornecer consulta

para uma possível análise econômica completa. Esta é, portanto, uma ideia para trabalhos futuros com base neste projeto.

Uma consequência adicional pode ser extraída dos resultados obtidos. O conjunto de cenários simulados inicialmente considerou que, devido ao maior tráfego do serviço de navegação web HTTP, foi pressuposto que a operadora com maior investimento nesse serviço deveria comprar parte do espectro da outra, que investe no serviço de VoIP ou vídeo. Para enfatizar essa suposição, o *throughput* da operadora que tem maior quantidade de tráfego web é superior à outra. Contudo, quando o número de usuários aumenta, a situação não é tão trivial; mesmo que a proporção de serviço por operadora seja diferente, o aumento na quantidade de usuários produz uma elevação no número de todos os serviços. Pode ser notado, pelo resultado do estudo da teoria dos jogos, que a suposição inicial não foi precisa, com relação ao serviço de *streaming* de vídeo.

Outra proposta posterior viável de ser implementada para incrementar os resultados é a inclusão de mais modelos de serviço, para que os cenários se aproximem de situações reais. O método utilizado neste trabalho de conclusão de curso para modelar os cenários foram muito simplificados; obviamente, uma operadora de serviço móvel não está restrita somente a três tipos de serviço.

Ainda no contexto de sugestão de análises seguintes, a condição proposta neste trabalho foi baseada no compartilhamento da rede de acesso aos recursos de rádio; entretanto, existem mais configurações de compartilhamento, conforme mostrado anteriormente. Um plano de pesquisa interessante pode conter mais estruturas de integração, como o compartilhamento de infraestrutura física (envolvendo tanto os eNodeBs quanto o núcleo da rede), assim como a coexistência de diferentes tecnologias 4G como infraestrutura de acesso.

Com relação às simplificações, existem duas consideradas que é possível que influenciem nos resultados: a técnica de retransmissão, HARQ, e abstração da camada física. Embora não sejam diretamente ligadas ao contexto do problema, podem modificar resultados de escalonamento de recursos, e são outras opções de desenvolvimento futuro.

No caso do HARQ, é natural que, se o enlace é favorável (alta SNR), o canal tem pouca interferência do ruído e a integridade dos dados é mantida sem necessidade de retransmissões. Na prática, entretanto, isso tem menor probabilidade de ocorrência. Dessa forma, é vantajoso incluir essa característica no escalonamento de recursos, e analisar se existe alguma interferência no problema.

Sobre a abstração da camada física, é importante notar que as simulações foram realizadas justamente considerando o enlace favorável; desta forma, outras possibilidades também são de implementação vantajosa. Portanto, um simulador com implantação completa da camada física ofereceria condições melhores de simulação, para que a situação

real seja melhor retratada.

Por fim, com toda a competitividade que o mercado da área apresenta, o desenvolvimento do simulador e dos cenários de compartilhamento de RAN realizados neste trabalho podem auxiliar em um possível estudo no âmbito nacional. As empresas já demonstram o grande interesse no RAN *sharing*; a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), agência reguladora da área no Brasil, tem evoluído no processo regulatório para estimular o compartilhamento de rede. Essa nova realidade exige processos de tomada de decisão baseados em informações tal como os dados quantitativos e qualitativos apresentados neste trabalho.

Referências

- 1 Stefania Sesia and Issam Toufik and Matthew Baker. *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Reino Unido: [s.n.], 2011. Citado 18 vezes nas páginas 9, 19, 25, 26, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 43, 45, 46, 48, 62 e 63.
- 2 Fabbryccio A. C. M. Cardoso and Donato Manzan Junior and Rafael Mendes Vilela and Fabricio Lira Figueiredo. Tecnologias de camada física e MAC para redes LTE. In: *Cad. CPqD Tecnologia*. [S.l.: s.n.], 2010 – 2011. v. 7, n. 1, p. 7–22. Citado 4 vezes nas páginas 9, 19, 28 e 37.
- 3 Khan, F. *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009. Citado 14 vezes nas páginas 9, 10, 29, 32, 33, 37, 40, 63, 66, 67, 68, 69, 70 e 75.
- 4 Holma, Dr Harri and Toskala, Dr Antti. *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. [S.l.]: Wiley Publishing, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 9, 10, 45, 58, 59, 70 e 72.
- 5 Timo Nihtila et al. System performance of LTE and IEEE 802.11 coexisting on a shared frequency band. *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2013. Citado na página 19.
- 6 Kokku, Ravi and Mahindra, Rajesh and Zhang, Honghai and Rangarajan, Sampath. CellSlice: Cellular wireless resource slicing for active RAN sharing. In: *COMSNETS*. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 1–10. Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 52.
- 7 Stefan Zehle, Graham Friend. *Network Sharing business planning*. 2010. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- 8 NEC CORPORATION. *NEC's Approach towards Active Radio Access Network Sharing*. [S.l.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 10, 20 e 51.
- 9 BRISKWAVE CONSULTING. *LTE Network Sharing: Some Operational and Management Aspects*. [S.l.], 2013. Citado na página 20.
- 10 3rd Generation Partnership Project. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*. [S.l.], 2014. Citado 7 vezes nas páginas 22, 55, 62, 64, 65, 66 e 78.
- 11 Ghosh, A. and Zhang, J. and Andrews, J.G. and Muhamed, R. *Fundamentals of LTE*. [S.l.]: Pearson Education, 2010. (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series). Citado 3 vezes nas páginas 26, 62 e 64.
- 12 Zarrinkoub, H. *Understanding LTE with MATLAB: From Mathematical Modeling to Simulation and Prototyping*. [S.l.]: Wiley, 2014. (Wiley Desktop Editions). Citado na página 28.
- 13 RAYAL, F. LTE in a Nutshell: System Overview. 2010. Citado na página 31.

- 14 Ali-Yahiya, T. *Understanding LTE and its Performance*. [S.l.]: Springer, 2011. (SpringerLink : Bücher). Citado 4 vezes nas páginas 32, 34, 35 e 37.
- 15 SRIKANTH, S.; PANDIAN, P. A. M.; FERNANDO, A. U. X. Orthogonal Frequency Division Multiple Access in WiMAX and LTE: A Comparison. In: *IEEE Communications Magazine*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 153–161. Citado na página 38.
- 16 ANRITSU. *LTE Resources Guide*. [S.l.], 2013. Citado na página 42.
- 17 3rd Generation Partnership Project. *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture*. [S.l.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.
- 18 Sajid Hussain. Dynamic Radio Resource Management in 3GPP LTE. 2009. Citado na página 49.
- 19 Reginaldo J. Santos. *Um Curso de Geometria Analítica e Álgebra Linear*. [S.l.]: Imprensa Universitária da UFMG – MG, Brasil, 2003. Citado na página 60.
- 20 Preet K. Rekhi, Mohit Luthra, Sukhvinder Malik, Rahul Atri. Throughput Calculation for LTE TDD and FDD System. In: . [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 65.
- 21 R. Thomas Derryberry. *1xEV-DV Evaluation Methodology*. [S.l.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 66, 68 e 69.
- 22 Monghal, Guillaume and Pedersen, Klaus I. and Kovács, István Z. and Mogensen, Preben E. QoS Oriented Time and Frequency Domain Packet Schedulers for The UTRAN Long Term Evolution. In: *VTC Spring*. [S.l.]: IEEE, 2008. p. 2532–2536. Citado 3 vezes nas páginas 70, 71 e 72.
- 23 Kolding, Troels E. QoS-Aware Proportional Fair Packet Scheduling with Required Activity Detection. In: *VTC Fall*. [S.l.]: IEEE, 2006. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 71.
- 24 Zaki, Yasir and Weerawardane, Thushara and Görg, Carmelita and Timm-Giel, Andreas. Multi-QoS-Aware Fair Scheduling for LTE. In: *VTC Spring*. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 71.
- 25 Laselva, D. and Steiner, J. and Khokhar, F. and Kolding, T.E. and Wigard, J. Optimization of QoS-aware Packet Schedulers in Multi-Service Scenarios over HSDPA. In: *Wireless Communication Systems, 2007. ISWCS 2007. 4th International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 123–127. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 71.
- 26 Marco A. S. de Vasconcellos, Roberto G. de Oliveira. *Manual de microeconomia*. 2a. [S.l.]: Editora Atlas S.A., 2009. Citado na página 89.